

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Приладобудівний
(повна назва інституту/факультету)

Приладів і систем орієнтації та навігації
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК 531.383

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Бурау Н.І.
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” 2018 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) 151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(код і назва спеціальності)

на тему: Слідкуючий координатор для підводного безпілотного апарату

Виконав : студент 6 курсу, групи ПГ-71мп
(шифр групи)

Тросковець Дмитро Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник проф., д.т.н. Бурау Н.І.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант Розроблення стартап-проекту к.е.н., доц. Бояринова К.О.
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент ст.викл. Божко К.М.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складає 87 сторінок, в ній містяться 33 ілюстрації, 22 таблиці і 21 використаних джерел.

Актуальність: На сьогоднішній день актуальною є проблема розробки слідкуючих систем наведення. На теперішній час задача супроводу цілі вирішується як в автоматичних так і в напівавтоматичних режимах. Сучасні слідкуючі комплекси представляють собою сукупність пристроїв призначених для виявлення, розпізнавання, визначення координат цілі та рішення задачі її супроводу.

Слідкуюча система для супроводу цілі являє собою систему автоматичного управління до якої висуваються високі вимоги по точності надійності і здатності зберігати свої властивості в умовах невизначеностей проявляються при використанні їх як на підводних, наземних чи повітряних апаратах. Прагнення до побудови високоточних і високонадійних систем автосупроводу обумовлює актуальність проектування слідкуючих систем із застосуванням сучасної теорії автоматичного керування.

Мета дослідження: розробка слідкуючого координатора з компенсацією впливу нелінійних елементів.

Завдання:

1. Огляд стану проблеми.
2. Проведення дослідження слідкуючого координатора, як системи автоматичного керування.
3. Проведення імітаційного моделювання систем керування при дії ступінчатого сигналу, гармонічного збудження, побудова логарифмічної частотної характеристики.
4. Дослідження впливу нелінійності виконавчого двигуна на перехідну характеристику та усталений режим слідкуючого координатора.
5. Обґрунтування розробки регулятора на основі нечіткої логіки, дослідження слідкуючого координатора з використання нечіткого регулятора.

Об'єкт дослідження: слідкуючий координатор.

Предмет дослідження: динамічні характеристики, методи та засоби їх вдосконалення.

Методи дослідження:

1. Методи теорії лінійних систем автоматичного керування.
2. Методи теорії нелінійних систем.
3. Методи синтезу регуляторів на основі нечіткої логіки.
4. Методи моделювання в середовищі Simulink.

Наукова новизна: наукова новизна полягає у вдосконаленні вихідних характеристик слідкуючого координатора для безпілотного підводного апарату шляхом компенсації впливу нелінійності виконавчого двигуна.

Практичне значення: практичне значення полягає в розроблених структурних схемах, схемах моделювання. Показано, що застосування нечіткого регулятора забезпечує усунення перерегулювання у перехідній функції слідкуючого координатора.

Апробація результатів дисертації (виступи на науково-технічних конференціях):

1. XIV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених, «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні», Київ, 2018.

Публікації:

1. Тросковець Д.О. Огляд та перспективи розвитку слідкуючих координаторів / Д.О. Тросковець // Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні: збірник статей XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених / Нац. тех. ун-т України «КПІ ім. Ігоря Сікорського». – Київ, 2018, - С. 33-36.

Ключові слова: слідкуючі системи, автоматичне упарвління, слідкуючий координатор, нечіткий регулятор, нечітка логіка, нелінійність.

ABSTRACT

The master's dissertation is 87 pages, it contains 33 illustrations, 22 tables and 21 used sources.

Actuality: To date, the problem of developing follow-up guidance systems is relevant. At present, the goal of supporting the goal is solved both in automatic and semi-automatic modes. Modern tracking complexes represent a set of devices intended to detect, recognize, determine the coordinates of the goal and solve the problem of its maintenance.

The tracking system for the purpose of maintenance is an automatic control system to which high requirements for the accuracy of reliability and the ability to maintain their properties in conditions of uncertainty appear when using them as underwater, terrestrial or airborne vehicles. The desire to build high-precision and highly reliable auto-propagation systems causes the urgency of designing follow-up systems with the use of modern theory of automatic control.

The purpose of the research: the development of a follow-up coordinator with the compensation of the influence of nonlinear elements.

Task:

1. Review the state of the problem.
2. Carrying out a research coordinator as an automatic control system.
3. Conducting simulation of control systems under the action of a stepped signal, harmonic excitation, construction of a logarithmic frequency characteristic.
4. Investigation of the influence of the nonlinearity of the actuator on the transient characteristic and the steady state of the tracking coordinator.
5. The justification of the development of the regulator on the basis of fuzzy logic, the study of the follower coordinator on the use of a fuzzy controller.

Object of research: follow-up coordinator.

Subject of research: dynamic characteristics, methods and means of their improvement.

Research methods:

1. Methods of the theory of linear systems of automatic control.

2. Methods of the theory of nonlinear systems.
3. Methods of synthesizing regulators based on fuzzy logic.
4. Simulink simulation methods.

Scientific novelty: the scientific novelty consists in improving the initial characteristics of the tracking coordinator for an unmanned underwater vehicle by compensating for the influence of the nonlinearity of the actuator.

Practical significance: the practical value lies in the elaborated structural schemes, the schemes of modeling. It is shown that the use of a fuzzy controller provides the elimination of overregulation in the transition function of the follow-up coordinator.

Approbation of the results of the dissertation (presentations at scientific and technical conferences):

1. XIV All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, "Efficiency of Engineering Solutions in Instrumentation", Kyiv, 2018.

Publications:

1. Troskovets D.O. Overview and prospects for the development of follow-up coordinators / D.O. Troskovets // Efficiency of engineering solutions in instrument making: a collection of articles of the XIV All-Ukrainian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists / National Academy of Sciences. those Unitary of Ukraine "KPI them. Igor Sikorsky ". - Kyiv, 2018, - P. 33-36.

Key words: follow-up systems, automatic matching, follow-up coordinator, fuzzy controller, fuzzy logic, nonlinearity.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	11
ВСТУП.....	12
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ.....	14
1.1 Оптико-електронні координатори цілі.....	14
1.2 Радіотехнічні координатори	19
1.3 Огляд публікацій та літератури.....	24
1.4 Мета і завдання дослідження.....	27
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ СЛІДКУЮЧОГО КООРДИНАТОРА, ЯК СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ	28
2.1. Загальна характеристика слідкуючого координатора	28
2.2. Дослідження динамічних характеристик слідкуючого координатора	31
2.2.1. Аналіз усталеної помилки.....	32
2.2.2 Аналіз стійкості за критерієм Гурвіца	34
2.3 Моделювання слідкуючого координатора в системі Simulink	36
2.3.1 Реакція на функцію Хевісайда (ступінчата дія).....	36
2.3.2 Реакція на гармонічне збурення	38
2.3.3 Побудова логарифмічних частотних характеристик розімкненої системи.	41
2.3.4 Дослідження слідкуючого координатора з зоною нечутливості.	42
Висновки до розділу 2	46
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИФРОВОГО НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА У СЛІДКУЮЧОМУ КООРДИНАТОРІ	47
3.1 Функціональна та структурна схеми системи керування на базі нечіткої логіки.	47
3.2 Огляд алгоритму Мамдані для нечіткого виводу	50
3.3 Дослідження синтезу нечіткого регулятора системи керування об'єктом з нелінійністю типу «зона нечутливості+насичення».	53
Висновки до розділу 3	63

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «СЛІДКУЮЧИЙ КООРДИНАТОР ДЛЯ ПІДВОДНОГО БЕЗПЛОТНОГО АПАРАТУ»	64
4.1. Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології)	64
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	66
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	67
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту.....	76
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	79
Висновки до розділу 4	83
ВИСНОВКИ	86
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	87

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач.

ГСН – голівка самонаведення.

ДСА – діаграма спрямованості антен.

ЛВЦ – лінія візування цілі.

НР – нечіткий регулятор.

ОЕС – оптико-електронні системи.

ОЕК – оптико-електронний координатор.

ОЕКЦ – оптико-електронні координатори цілі.

ПТЦ – помилкова теплова ціль.

ПХ – пеленгаційна характеристика.

РТК – радіотехнічні координатори.

РЛС – радіолокаційна станція.

РСЗ – радіосигнальна зона.

ФП – функція приналежності

ВСТУП

В магістерській дисертації за напрямком досліджень «Слідкуючий координатор для підводного безпілотного апарату» розглянуто сучасний стан слідкуючих систем, а також проведено огляд основних методів, які потрібні для вдосконалення слідкуючих систем. Слідкуюча система, в структуру якої входить слідкуючий координатор напряму пов'язана з теорією автоматичного керування. Термін «автоматичне керування» означає процес управління технічним об'єктом без втручання людини. При цьому об'єкт управління повинен бути здатний сприймати управляючі дії - сигнали, що містять інформацію про те, що повинно в них статися. У більшості випадків ці сигнали генеруються спеціальним керуючим пристроєм на основі інформації про поточний стан об'єкта та його оточення. Таким чином, предметом автоматичного управління, є інформаційні зв'язки й потоки в системі, утворені об'єктом управління і керуючим їм пристроєм, безвідносно до їх фізичну природу і конкретному технічному виконанню. Той же принцип управління використовується в слідкуючих системах [1].

Слідкуюча система - автоматична система, завдання якої полягає в зміні керованої величини відповідно до зазделегідь невідомої функції часу, що визначається задаючим впливом. Існує декілька типів таких систем і в цій роботі буде розглянуто системи зі слідкуючими координаторами.

Останнім часом у зв'язку з розвитком технологій з'явилися нові типи слідкуючих систем - оптико-електронні [2]. Оптико-електронні системи (ОЕС) досить таки швидко знайшли застосування в різних областях життєдіяльності людини. Але за великим рахунком ОЕС задіюються у військовій техніці, а саме, в системах самонаведення. З цього, в зв'язку з ростом популярності оптоелектроніки і систем стеження за об'єктом, цю сферу почали вивчати ґрунтовно. Одним з широко використовуваних класів ОЕС наведення є оптико-електронні координатори цілі (ОЕКЦ), які призначені для пошуку і захоплення цілі, а також її супроводу. Слідкуючі системи з ОЕКЦ широко застосовують в приладобудуванні,

вимірювальної техніки, астрономії, високотемпературних виробничих процесах, авіаційній і космічній техніці [2].

Крім ОЕКЦ існують також радіотехнічні координатори (РТК). Саме РТК забезпечує вироблення сигналів управління антеною та вимір координат цілі [3]. РТК по більшості своїй застосовуються на радіолокаційних станціях (РЛС). РЛС вирішує завдання супроводу цілі, яка досягається за рахунок визначення координат положення цілі в просторі і видачі сигналів управління на переміщення антени, тим самим забезпечуючи постійне відстежування положення цілі в мінливу повітряну обстановку.

Слідкуюча система, при її використанні, зазнає значних похибок при відстежуванні об'єкту, такі як неточне визначення координатів цілі, великий кут пеленгу та ін. Для того щоб усунути цю проблему, було запропоновано використовувати самій системі нечіткий регулятор на базі нечіткої логіки. Передбачається, що нечіткий регулятор дасть можливість покращити перехідний процес системи, а також зменшити похибку в усталеному режимі.

У пропонованій роботі розглянуто класифікацію існуючих координаторів, принцип побудови і вирішувани задачі.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ

1.1 Оптико-електронні координатори цілі

Слідкуючі з ОЕК за своїм призначенням багато в чому аналогічні звичайним слідкуючим системам. Основна відмінність їх полягає в формуванні вхідних сигналів у вигляді двовимірних скалярних зображень тривимірного простору за законами геометричної оптики і в обробці цих сигналів засобами електроніки. Розглянуті слідкуючі системи повинні відповідати певним вимогам і забезпечувати їх виконання в конкретних умовах експлуатації. Найчастіше основними вимогами є стійкість, дальність дії, точність роботи і перешкодозахищеність в широкому діапазоні вхідних величин. Найбільш відповідальним вузлом, що визначає виконання цих вимог, є оптико-електронний координатор. В процесі функціонування цих складних оптико-електронних пристроїв використовуються сигнали двох типів: електричні та оптичні[2].

Слідкуючі системи представляють собою замкнуті автоматичні системи, в яких вихідна величина відтворює з певною точністю вхідну величину, довільно змінюється в часі. Найпростіша нескорегована слідкуюча система показана на рис. 1.1 [2].

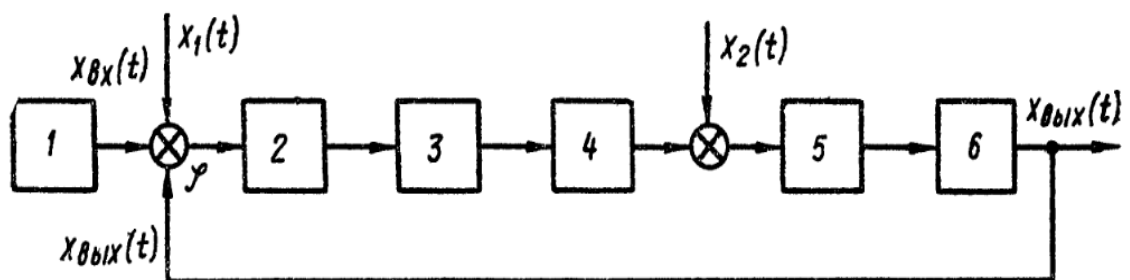


Рис.1.1 Структурна схема найпростішої слідкуючої системи

1 - відстежуваний об'єкт, 2 - вимірювальний пристрій, 3 - підсилювач напруги, 4 - підсилювач потужності, 5 - виконавчий пристрій, 6 - керований елемент.

Вхідною величиною $x_{вх}(t)$ системи може бути той чи інший параметр, характеризуючий стан відслідковуючого об'єкту (координата, швидкість

переміщення, температура та ін.). Вихідна величина $x_{\text{вих}}(t)$ слідкуючої системи характеризується станом керуючого об'єкту. Різниця $\varphi(t)$ між вхідними та вихідними величинами називають сигналом неузгодженості або помилкою ($\varphi(t) = x_{\text{вх}}(t) - x_{\text{вих}}(t)$). Крім вхідної величини до слідкуючої системи можуть бути додані інші збурюючі дії $x_1(t)$ і $x_2(t)$, які, в ряді випадків, є випадковими функціями часу[2].

Одним з головних елементів слідкуючої системи є пристрій, що вимірює сигнал неузгодженості $\varphi(t)$ і перетворює його в електричний сигнал $U_{\text{упр}}$, який використовується в подальших блоках системи. У даній роботі розглядаються слідкуючі системи, які призначені для відстеження об'єктів, які є джерелами власного або відбитого оптичного випромінювання [2]. У таких системах механічний зв'язок між відслідковуваними і керованими об'єктами замінена оптичним зв'язком, що дозволяє використовувати їх для автоматичного супроводу як нерухомих, так і рухомих в просторі джерел оптичного випромінювання, які перебувають на якій завгодно великій відстані від керованого об'єкта. Вимірювачі неузгодженості, що застосовуються в звичайних слідкуючих системах, тут замінені оптико-електронними координаторами, які дозволяють безперервно і автоматично вимірювати координати випромінює об'єкта [2]. Роль ОЕК в слідкуючих системах розглянутого типу виключно велика: їх точності, статичні і динамічні характеристики багато в чому визначають характеристики системи в цілому [2].

Слідкуючі з ОЕК (або як їх іноді називають «слідкуючі системи з оптичними зв'язками») широко застосовують в приладобудуванні, вимірювальної техніки, астрономії і космічній техніці [2]. Вони відрізняються високою точністю і при роботі не навантажують регульовані об'єкти додатковими силами і моментами. Області застосування слідкуючі систем з ОЕК безперервно розширюються; їх подальше вдосконалення внесе великий внесок в розвиток високоякісних систем автоматичного управління об'єктами різного призначення [2].

Координаторами називають пристрої, що служать для автоматичного безперервного або дискретного визначення кута (кута неузгодженості) між заданою віссю і напрямком на нерухомий або об'єкт, що рухається.

Зазвичай в слідкуючих системах для формування сигналів управління необхідно знати проекції кута неузгодженості на дві взаємно перпендикулярні площини управління: подовжню і поперечну. Проекцію кута неузгодженості ϕ на подовжню площину позначають ϕ_y , а поперечну - ϕ_z . Вихідними величинами оптико-електронних координаторів є напруги, що залежать від складових ϕ_y та ϕ_z кута неузгодженості [2].

Дія ОЕК ґрунтується на відмінності в параметрах власного або відбитого випромінювання об'єкта і навколишнього його фону. Кут неузгодженості і його і його складові в двох взаємно перпендикулярних площинах управління визначаються по положенню зображення об'єкта у фокальній площині оптичної системи [2].

Якщо кут неузгодженості $\phi = 0$, зображення об'єкта збігається з точкою О фокальній площині оптичної системи (рис. 1.2), через яку проходить оптична вісь Ох. При наявності кута неузгодженості зображення об'єкта зміщується щодо точки О на деяку відстань ρ , яке залежить від цього кута [2]. Позначаючи $f_{об}$ - фокусна відстань об'єктива оптичної системи і маючи на увазі, що в процесі роботи координатора кути неузгодженості ϕ не перевищують $5...10^\circ$, відповідно до рис. 1.2 знаходимо рівняння, що характеризують лінійні відхилення зображення об'єкта [2]:

$$\rho = f_{об} \operatorname{tg} \phi \approx f_{об} \phi; \quad \rho_y = f_{об} \operatorname{tg} \phi_y \approx f_{об} \phi_y, \quad \rho_z = f_{об} \operatorname{tg} \phi_z \approx f_{об} \phi_z,$$

де ϕ_y та ϕ_z – проекції кута неузгодженості ϕ на подовжню вісь $O_1O_2\eta$ і поперечну $O_1O_2\xi$ взаємно перпендикулярні площини управління.

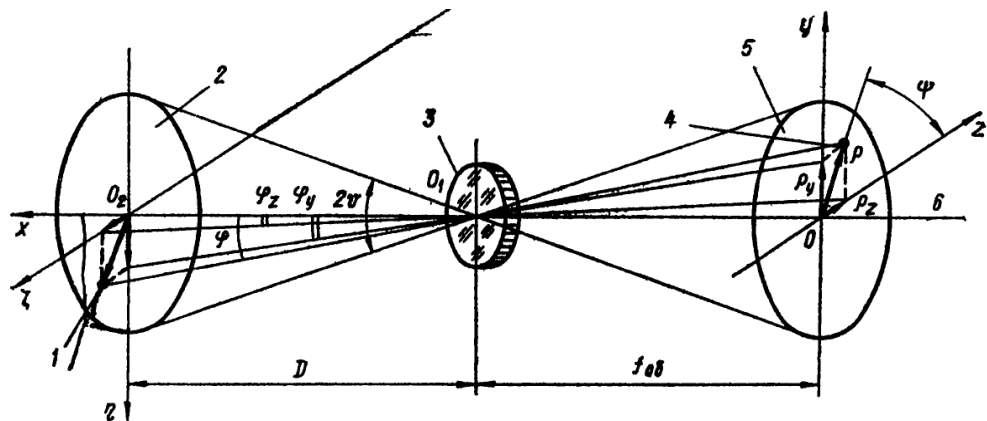


Рис.1.2 До пояснення принципу визначення кутових координат відслідкованого об'єкта ОЕК

1 – об'єкт; 2 – площа розташування об'єкта; 3 - об'єктив; 4 – зображення об'єкта; 5 – фокальна площа об'єктива; 6 – вісь координатора.

Принцип дії ОЕК полягає в наступному [2]. Зображення об'єкта проектується оптичною системою (об'єктивом) на фокальній площині. Контрастність об'єкта, обумовлена тим, що його енергетична яскравість відрізняється від енергетичної яскравості інших предметів, що утворюють фон, дозволяє отримати на виході приймача випромінювання різні сигнали від об'єкта і фону. За допомогою підсилювача фотоструму і оптичних спектральних фільтрів сигнали від фону послаблюються, а від об'єкта - посилюються. Спеціальні аналізують елементи визначають координати ρ_y и ρ_z зображення об'єкта у фокальній площині, що характеризують складові φ_y и φ_z кута неузгодженості.

Оптико-електронні координатори складаються з елементів (які виконують певні функції), основними з яких є [2]:

- оптична система*, яка збирає потік випромінювання об'єкта і концентрує його на чутливий елемент потоку випромінювання;

- приймач випромінювання*, що перетворює приходить до нього енергію оптичного випромінювання в електричний струм;

- оптичний фільтр*, що послабляє випромінювання фону;

- аналізуючий елемент*, службовець для аналізу картинній площині і визначення координат зображення об'єкта;

- підсилювач фотоструму*, з пристроями для автоматичного регулювання посилення;

- схема виділення напруг*, що залежать від складових кута неузгодженості в двох взаємно перпендикулярних площинах.

У подальшому викладі використовується наступна термінологія [2]

- *поле зору координатора* - кут 2ϑ (рис. 1.2) у вершини конуса, пов'язаної з оптичною системою. Утворює цього конуса дорівнює максимальній дальності дії координатора D_{max} . Об'єкт, що знаходиться в будь-якій точці конуса, проектується на чутливий елемент потоку випромінювання і викликає появу сигналу на його виході;

- *вісь координатора* - лінія в межах поля зору, що характеризується тим властивістю, що при нерухомій положенні об'єкта в будь-якій точці лінії напруги на виході координатора дорівнюють нулю. У багатьох випадках віссю координатора служить вісь його оптичної системи;
- *площина неузгодженості* - площина, що проходить через вісь координатора і напрямком на об'єкт (лінія з'єднує центр вхідного зіниці оптичної системи координатора об'єктом);
- *кут фазування* - кут ψ (рис 1.2), який визначає положення площини неузгодженості щодо площині O_1Oz , прийнятої за відліковим.

За принципом пристрою ОЕК можна розділити на два основні класи [2]: з модуляцією потоку випромінювання, падаючого на чутливу майданчик потоку випромінювання, і без модуляції потоку випромінювання. Особливу групу координаторів другого класу утворюють ОЕК, засновані на використанні приладів із зарядним зв'язком. Вони мають велику перспективу розвитку, хоча і є досить складними пристроями.

Головні характеристики і параметри координатора [2]:

- *пеленгаційні характеристики*, що представляють залежності вихідних напруг координатора від складових кута неузгодженості в двох взаємно перпендикулярних площинах $U_y = U_y(\varphi_y)$ та $U_z = U_z(\varphi_z)$. Зазвичай ці характеристики ідентичні для обох площин неузгодженості, тому під його пеленгаційної характеристикою розуміють залежність $U = U(\varphi)$ для будь-якій площині;

- *середньоквадратична помилка $\overline{\varphi^2}$* у вимірі кута неузгодженості (або його складових в двох взаємно перпендикулярних площинах);

передавальне функція $W(p)$, що характеризує інерційні властивості координатора. Зазвичай інерційністю координатора нехтують, вважаючи $W(p)$ рівним коефіцієнту підсилення; іноді приймають $W(p) = \frac{k}{(1+pT_k)}$ тобто вважають координатор аперіодическим ланкою з постійним часом T_k ;

-просторово-частотна передаточна функція $W(i\mu, iv)$, відображаючи селективні властивості координатора по відношенню до просторово рознесених об'єктів.

Оптико-електронні координатори є найбільш важливими елементами слідкуючих систем, так як визначають точність і надійність їх роботи [2]. Цим пояснюється велика різноманітність схем і конструкцій координаторів і безперервні прагнення інженерів-конструкторів розробити «оптимальний» ОЕК, найкращим чином задовольняє поставленим технічним вимогам.

1.2 Радіотехнічні координатори

Радіолокація – метод виявлення і визначення місцезнаходження об'єктів за допомогою радіохвиль. Ці хвилі випромінюються радіолокаційною станцією, відбиваються від об'єкта і повертаються на станцію, яка аналізує їх, щоб точно визначити місце, де знаходиться об'єкт [3].

Інформація, що отримується в процесі радіолокаційного спостереження, називається радіолокаційною. Радіотехнічні пристрої радіолокаційного спостереження називаються радіолокаційними станціями (РЛС) або радіолокаторами [4]. Самі ж об'єкти радіолокаційного спостереження іменуються радіолокаційними цілями або просто цілями. При використанні відбитих радіохвиль радіолокаційними цілями є літальні апарати (літаки, вертольоти, метеорологічні зонди та ін.), гідрометеори (дощ, сніг, град, хмари і т. Д.), річкові та морські судна, наземні об'єкти (будови, автомобілі, літаки в аеропортах і ін.) тощо [4].

Виділення корисної інформації про цілі забезпечуються відповідними радіотехнічними пристроями - РЛС. Таким чином систему РЛС можна розглядати як радіолокаційний канал. Основними складовими частинами РЛС є передавач, приймач, антенний пристрій, термінал [4].

Крім виявлення цілей, РЛС вирішує завдання супроводу цілі, яка досягається за рахунок визначення координат положення цілі в просторі і видачі сигналів управління на переміщення антени, тим самим забезпечуючи постійне

відстежування положення цілі в мінливої повітряну обстановку [4]. Комплекс пристроїв забезпечує вироблення сигналів управління антеною, вимір координат цілі об'єднуються в пристрій іменований як радіотехнічний координатор [4].

Радіотехнічні координатори (РТК) - це пристрої, що забезпечують безперервне і точне вимірювання координат цілі (наприклад ракети) і параметрів їх руху в заданій вимірювальній системі координат і є невід'ємним елементом побудови радіолокаційних станцій (РЛС) огляду та супроводу [4]. Для вирішення завдання виявлення і супроводу цілей в РТК використовується ряд радіотехнічних пристроїв (систем) працюють в комплексі і тісно взаємопов'язаних між собою.

РТК класифікуються за такими ознаками [4]:

- по числу вимірюваних координат:

- Координатори-локатори вимірюють дальність $r_{ц}$, азимут $\beta_{ц}$ і кут місця $\varepsilon_{ц}$.
- Координатори - пеленгатори, що вимірюють тільки кутові координати.

- за принципом локації:

- Звичайні координатори-локатори з пасивним відкликом, що працюють тільки на прийом.
- Координатори-локатори з активним відкликом, побудовані за принципом радіозапиту.
- Активні, основна маса РЛС, які використовують випромінювання власних радіосигналів, прийом і обробку відображених радіосигналів від цілей.
- Напівактивні, РТК використовують змішаний спосіб наведення (супроводу): пасивний метод, використовуючи чуже випромінювання; активний метод - власне випромінювання.

- по виду прийнятих і випромінюваних сигналів:

- Імпульсні.
- З безперервним випромінюванням.

- за способом вимірювання кутових координат:

- РТК, у яких в процесі супроводу цілі вісь координатора постійно поєднана з ціллю. В цьому випадку розрізняють координатори двох типів:

- а) з пов'язаними осями;
- б) не пов'язаними осями;

Недоліками таких координаторів є обмежений кут огляду, який визначається шириною діаграми спрямованості антени [4].

- за методом визначення напрямку на об'єкт [4]:

- З лінійним скануванням.
- З рівносигнальною зоною.

За типом рівносигнальної зони (РСЗ) координатори діляться на координатори: з миттєвою РСЗ, з інтегрованою РСЗ, з комбінованої РСЗ [4].

Вимірювання координат цілі здійснюється в системі координат пов'язаної координатором. Вважаємо, що початок цієї системи збігається з антеною координатора (рис. 1.3), при цьому, як уже зазначалося, вісь координатора може і не збігатися з віссю антени. Напрямок ОЦ відповідає дальності до цілі $r_{ц}$, а кутові координати вимірюються або в полярній, або декартовій системі координат [4].

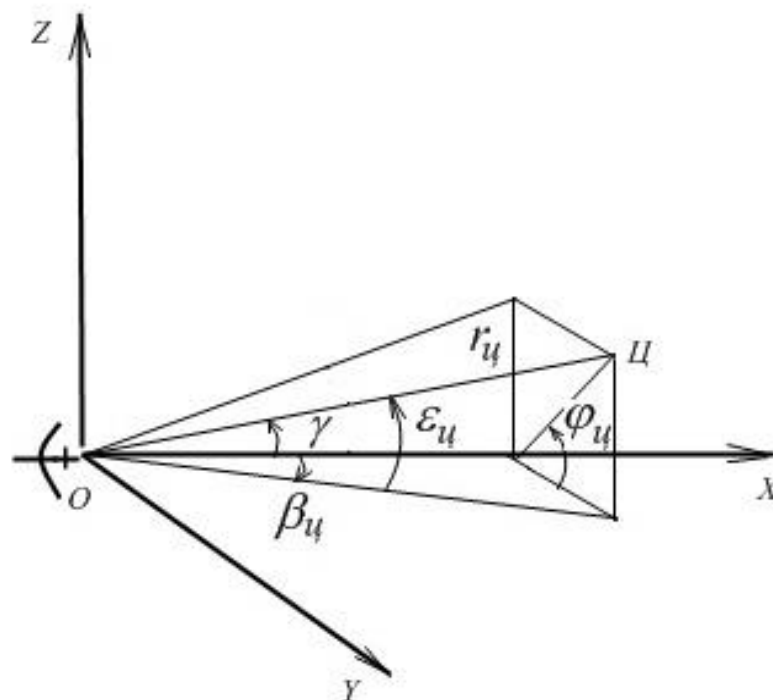


Рис. 1.3 Система координат, яка зв'язана з антеною координатора

В полярній системі координат вимірюються кути: γ - кут між площиною XOY і XOZ ; φ_{α} - фазовий кут, кут між площинами XOY і XOZ [4].

У декартовій системі координат вимірюються кути: β_{α} - азимут, ε_{α} кут місця.

- способи вимірювання кутових координат:

- Поєднання осі координатора (ОК) з лінією візування цілі (ЛВЦ)
- Вимірювання кута між ОК (при жорсткій фіксації осі координатора в заданому напрямку) і ЛВЦ

- методи пеленгування:

- Метод накопичення пачок імпульсів при лінійному скануванні діаграми спрямованості антени (ДСА)
- Метод рівно сигнальної зони (РСЗ). Розрізняють миттєву РСЗ та інтегральну РСЗ.
- Комбіновані методи (об'єднують інтегральний і миттєвий метод).

- основні характеристики і параметри координаторів, загальні вимоги пред'являються їм.

Розрізняють поняття тактичних і технічних характеристик [4].

- Тактичні характеристики: дальність дії, кутові розміри сектора огляду, час огляду, дозволяють здібності по дальності, кутових координатах і швидкості. Пропускна здатність (число одночасно супроводжуваних цілей і дані про них в одиницю часу), перешкодозахищеність, надійність, нормативи технічного обслуговування, кліматичні умови використання [4].
- Технічні характеристики: довжина хвилі, потужність випромінюваного сигналу, вид випромінюваного сигналу, форма і ширина ДСА, метод огляду і вимірювання дальності, кутових координат і швидкості, частота повторення і тривалість зондуючих імпульсів, чутливість приймача і його смуга пропускання, споживана станцією енергія, розміри і вага [4].

- вимоги до радіотехнічним координаторам як системі вимірювання

- Точність і стабільність параметрів. Під стабільністю параметрів розуміємо стабільність нуля пеленгаційної характеристики (ПХ) і стабільність крутизни пеленгаційної характеристики [4].

Для координатора слідкуючого типу найбільш важливою характеристикою є стабільність нуля. Догляд кривизни ПХ мало позначається на точність вимірювання.

Для координатора ж з фіксованою віссю важливі обидва показники, так як вихідна напруга кутових дискримінаторів цих координаторів безпосередньо відображає кутові координати [4].

- Пеленгаційної чутливість, характеризує мінімальний кут ($\beta_{ц min}$, $\varepsilon_{ц min}$) відхилення цілі від ОК, на який ще не реагує кутомір, вона визначає ширину зони нечутливості ε_{min} . Очевидно чим менше ε_{min} , тим точність вимірювання кутових координат вище [4].
- Лінійність між виходом і виміряної величиною, забезпечує необхідну точність у визначенні похідних кутових координат і дальності [4].
- Безперервність (періодичність) вимірювання координат. Від цього параметра залежить систематична помилка запізнювання, викликана переривчастим (дискретністю) вимірюванням координат [4].
- Можливість одночасного супроводу і вимірювання координат декількох цілей [4].
- Можливість вимірювання координат однієї (кількох) обраної мети та спостереження всіх цілей [4].
- Діапазон вимірювання кутів і відстаней [4].

Існуючі методи пеленгації, вимірювання кутових координат, дальності, швидкості цілі дозволяють використовувати переваги існуючих радіотехнічних координаторів для вирішення поставлених завдань. Найбільш практичним вважається використання для побудови радіотехнічних систем пошуку і супроводу цілей кількох, об'єднаних єдиною функціональним завданням, найбільш вдало реалізованих схем радіотехнічних координаторів. Найбільш повно дана проблема вирішена в багатофункціональних РЛС [4].

Таке рішення дозволяє, шляхом перемикання, а часто і в результаті паралельної роботи, використовувати переваги того чи іншого методу виявлення і супроводу цілей в залежності від обстановки [4].

Історія розвитку засобів радіолокації є комплексом заходів спрямований, перш за все, на підвищення ймовірності виявлення, точності і дальності супроводу, помехозащищенности, зручності управління і ряду інших показників, що впливають на якість і характер технічних, маневрених і бойових характеристик. Причому зміна йде відразу за кількома параметрами відразу, що дозволяє зробити новий крок дозволяє піднятися на новий рівень [4].

Існуюча боротьба між засобами виявлення і системами захисту стимулює прийняття нестандартних рішень.

Останнім часом з'явилася тенденція в отриманні можливості управління і отримання технічної інформації від різних РЛС, різного «парку», часу випуску, на єдиний центр управління [4].

1.3 Огляд публікацій та літератури

Розробкам систем самонаведення і їх підсистем присвячено багато праць, в числі яких книги, статті, патенти і т.д. Наприклад, винаходи які стосуються слідкуючих координаторів, а це в більшості своїй системи самонаведення, мають одне і те ж призначення, спрямоване на отримання одного і того самого технічного результату принципово одним і тим же шляхом, але різними технічними засобами. Відносяться можуть до області оптичного приладобудування і знаходять застосування в оптико-електронних приладах, наприклад, в інфрачервоних голівках самонаведення (ГСН) керованих ракет. Приклад цьому запатентований винахід, який стосується оптико-електронного слідкуючого координатора [5], та містить у собі три винаходи. У число основних завдань, що стоять перед розробками оптико-електронного стежить координатора (ОЕСК), входять [5]:

- забезпечення перешкодозахищеності від помилкових теплових цілей (ПТЦ);
- висока точність стабілізації оптичної осі, що суміщається з лінією візування (ЛВ) джерела;
- можливість відхилення оптичної осі на великі кути пеленга.

Завдання, яке вирішується кожним з винаходів групи, полягає в здатності ОЕСК здійснювати вибір і автосупровід повітряної цілі при наявності в полі зору пристрої перешкоджаючих джерел оптичного випромінювання, а також в забезпеченні можливості відхилення оптичної осі на великі кути пеленга.

При реалізації даних винаходів досягаємий технічний результат полягає в розширенні поля огляду при одночасному підвищенні точності стабілізації оптичної осі за рахунок розв'язки ЛВ від коливань корпусу ГСН по трьох осях і забезпеченні перешкодозахищеності від помилкових цілей. Також було створено алгоритм визначення кутової швидкості лінії візування [6]. В роботі вирішується завдання оцінки кутової швидкості лінії візування між двома рухомими об'єктами з жорстко закріпленим координатором і датчиком кутової швидкості на одному з них [6]. Крім досліджень самого координатора, так само існують винаходи, які по суті є допоміжним чинником для слідкуючих системи, приклад цьому патент «Спосіб формування оптичного поля для телеорієнтування керованих об'єктів і пристрій для його здійснення» [7]. Їх винахід відноситься до області дистанційного керування машинами, і, зокрема, літальними апаратами і призначене для формування оптичного поля для телеорієнтування керованих об'єктів. Винахід вирішує технічне завдання, спрямовану на зниження маси габаритів і енергоспоживання наземної апаратури; можливість передавати в промені поряд з інформацією про координати додаткову інформацію, можливість змінювати в процесі управління крутизну пеленгаційної характеристики і положення опорного напрямки [7]. До всього іншого є так само роботи присвячені саме математичної моделі для супроводу цілі. А якщо точніше, то в статті «Математична модель імовірності зриву автоматичного супроводу цілі оптичною системою при дії на неї оптичними організованими перешкоджаючими сигналами» [8], представлена математична модель розрахунку цієї ймовірності на прикладі оптичної головки самонаведення переносного зенітного ракетного комплексу (ОГС ПЗРК). Результати можуть бути використані при розробці систем захисту об'єктів різного базування від ПЗРК з ОГС [8]. Також виділяють радіотехнічні координатори, які відносяться до радіолокації [4]. Виділення корисної інформації про ціль забезпечується відповідними радіотехнічними пристроями - РЛС. Таким чином

систему РЛС можна розглядати як радіолокаційний канал. Основними складовими частинами РЛС є передавач, приймач, антенний пристрій, термінал. Крім виявлення цілей, РЛС вирішує завдання супроводу цілі, яка досягається за рахунок визначення координат положення цілі в просторі і видачі сигналів управління на переміщення антени, тим самим забезпечуючи постійне відстежування положення цілі в мінливої повітряну обстановку [4]. Комплекс пристроїв забезпечує вироблення сигналів управління антеною, вимір координат цілі об'єднуються в радіотехнічний координатор. Більшість з досліджуваних мною винаходів відносяться до слідкуючих гіроскопічних координаторів цілі систем самонаведення керованих об'єктів і можуть бути використані при створенні нових і модернізації існуючих систем наведення керованих об'єктів. Таким прикладом є винахід авторів, Григор'єва В. Г. і Григор'єва Д. В., під назвою «Слідкуючий координатор цілі» [9]. У даній роботі досліджуються відразу два слідкуючих координатора, оптичний і радіотехнічний. Недоліком оптичного координатора є порівняно невелика дальність його дії. А недоліком радіотехнічного координатора є порівняно невисока точність вимірювання їм кутової швидкості обертання в просторі вектора дальності об'єкта до цілі, обумовлена значними випадковими відхиленнями (флуктуаціями) радіосигналу, що приходить від мети [9]. Виходячи з недоліків, можна визначити, що даний винахід призначений для підвищення точності вимірювання кутової швидкості обертання в просторі вектора дальності об'єкта до мети при забезпеченні великої дальності дії координатора.

Окремої уваги заслуговує конкретно система самонаведення. Як приклад розглянемо кутовий координатор напівактивної системи самонаведення [10]. На відміну від системи радіотелекерування і радіотеленаведення в системі самонаведення контроль цілі і утворення команди управління проводяться на борту снаряда або будь-якого іншого об'єкта управління. У зв'язку з цим відпадає необхідність в каналі контролю руху снаряда і в лінії зв'язку для передачі команди з пункту управління на борт. Ця перша особливість самонаведення повинна привести до підвищення завадостійкості радіоуправління. Друга особливість систем самонаведення в порівнянні з більшою частиною систем телеуправління полягає в тому, що зазвичай інформація про взаємний рух витягується виміром

кутових координат, а помилка самонаведення, як правило, оцінюється мінімальним значенням лінійного відстані між метою і снарядом в процесі їх руху [10].

Також є роботи, які розглядають не тільки з точки зору автоматичного управління. Прикладом є стаття «Метод юстирування оптико-електронних координаторів цілі» [11]. Завдання даної роботи полягає в створенні апаратного застосування, розробці порядку виконання юстируючих операцій, а також в розробці математичного забезпечення методу, який при виконанні юстирування координатора цілі не вимагає використання тепловізорів і забезпечує мінімальне дефокусування зображення щодо аналізатора в робочому діапазоні температур [11].

1.4 Мета і завдання дослідження

Мета дослідження: розробка слідкуючого координатора з компенсацією впливу нелінійних елементів.

Завдання:

1. Огляд стану проблеми.
2. Проведення дослідження слідкуючого координатора, як системи автоматичного керування.
3. Проведення імітаційного моделювання систем керування при дії ступінчатого сигналу, гармонічного збудження, побудова логарифмічної частотної характеристики.
4. Дослідження впливу нелінійності виконавчого двигуна на перехідну характеристику та усталений режим слідкуючого координатора.
5. Обґрунтування розробки регулятора на основі нечіткої логіки, дослідження слідкуючого координатора з використання нечіткого регулятора.

РОЗДІЛ 2.

ДОСЛІДЖЕННЯ СЛІДКУЮЮЧОГО КООРДИНАТОРА, ЯК СИСТЕМУ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

2.1. Загальна характеристика слідкуючого координатора

Слідкуючими координаторами при самонаведенні на ціль називають пристрої, які вимірюють кутове положення цілі відносно своєї осі [12]. Координатор, як вимірювач кутового положення цілі, є вимірювачем неузгодженості $\vec{\Delta}_k$, яке визначається векторною нерівністю (див. рис. 2.1):

$$\vec{D}^0 - \vec{x}_k^0 = \vec{\Delta}_k \quad (2.1)$$

де \vec{D}^0 - одиничний вектор дальності до цілі, \vec{x}_k^0 - одиничний вектор осі координатора. $O_k x_k y_k z_k$ - система координат, в якій вимірюються кути неузгодженості та в якій вектор $\vec{\Delta}_k$ можна представити проекціями $\vec{\Delta}_{k1}$ та $\vec{\Delta}_{k2}$. При малій неузгодженості можна рахувати [12], що модулі векторів $\vec{\Delta}_{k1}$ та $\vec{\Delta}_{k2}$ рівні відповідним кутам Δ_{k1} та Δ_{k2}

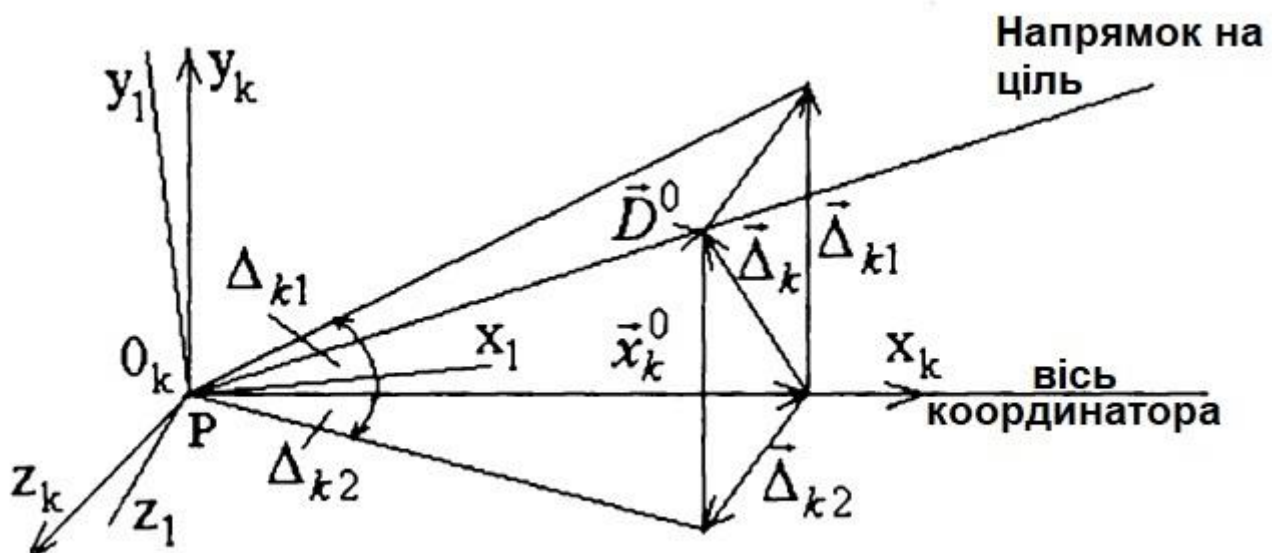


Рис. 2.1 Координатор, як вимірювач кутового положення цілі.

Рух антенної (оптичної) системи, а відповідно, й осі координатора визначається не тільки її рухом відносно ракети (відносний рух), але й рухом самої

ракети відносно центра маси (переносний рух). $Px_1y_1z_1$ - зв'язана з корпусом ракети система координат, в якій вісь Px_1 спрямована по поздовжній осі ракети.

Координатори, у яких рівносигнальна зона утворюється за допомогою декількох нерухомих симетрично розташованих відносно осі координатора пелюсток діаграми спрямованості антенної системи, називають координаторами з миттєвою рівносигнальною зоною [12].

Динамічні властивості координаторів з миттєвою рівносигнальною зоною (за умовою ідентичності каналів) наближено описуються лінійними диференціальними рівняннями [12]:

$$\begin{cases} T_k \dot{u}_1 + u_1 = k_k \Delta_{k1}; \\ T_k \dot{u}_2 + u_2 = k_k \Delta_{k2}, \end{cases} \quad (2.2)$$

де k_k - коефіцієнт посилення, T_k - постійна часу координатора, практично рівна постійній часу вихідного фільтра нижніх частот.

Вихідні сигнали координатора u_1 та u_2 посилюються за потужністю, частіше всього магнітними посилювачами, динаміка котрих описується рівняннями [12]

$$\begin{cases} T_y \dot{I}_1 + I_1 = k_y u_1; \\ T_y \dot{I}_2 + I_2 = k_y u_2, \end{cases} \quad (2.3)$$

де I_1 та I_2 - середні за півперіод робочого напруження значення вихідних токів в першому та другому каналах відповідно, T_y - постійна часу посилювачів, k_y - коефіцієнт посилення.

Для забезпечення просторового стеження антенна (або оптична) система, яка встановлена на ракеті в кардановому підвісі, механічно зв'язується з двома двигунами, на які поступають сигнали з виходів магнітних посилювачів та котрі обертають антенну (або оптичну) систему відносно двох взаємно перпендикулярних осей карданного підвісу. Рівняння, які описують роботу електродвигунів постійного струму (сумісно з редукторами), використаних в якості приводів слідкуючого координатора, при рівному нулю статичному моменті опору та постійному вхідному опорі, зводяться до виду [12]:

$$\begin{cases} T_{\theta} \dot{\Omega}_1 + \Omega_1 = -k_{\theta} I_2; \\ T_{\theta} \dot{\Omega}_2 + \Omega_2 = k_{\theta} I_1, \end{cases} \quad (2.4)$$

де T_{θ} та k_{θ} - постійна часу та коефіцієнт перетворення двигуна (з редуктором), обчислювання с урахуванням приведених моментів інерції, які приводяться в рух механічних деталей антенною (або оптичною) системою [12].

Напрямок однієї осі карданового підвісу співпадає з напрямком осі P_{y_1} або осі P_{z_1} зв'язаною з ракетою системи координат. При співпадинні однієї осі карданного підвісу, наприклад з віссю P_{y_1} , напрямок другої осі карданного підвісу повинен співпадати з віссю $O_k z_k$. Для забезпечення стеження за ціллю на вхід двигуна, обертаючого антенну (оптичну) систему відносно осі $O_k z_k$, треба подавати сигнал про неузгодженість Δ_{k_1} , а на вхід двигуна, який обертає антенну (оптичну) систему відносно P_{y_1} , сигнал про неузгодженість Δ_{k_2} , тобто на вхід двигуна Д1 треба подавати струм I_2 , а на вхід двигуна Д2 – струм I_1 (це враховано в рівняннях (2.4)) [12].

На основі рівнянь (2.2), (2.3) та (2.4) можна скласти структурну схему кожного каналу (канали ідентичні) слідкуючого координатора з електричним приводом (рис.2.2).

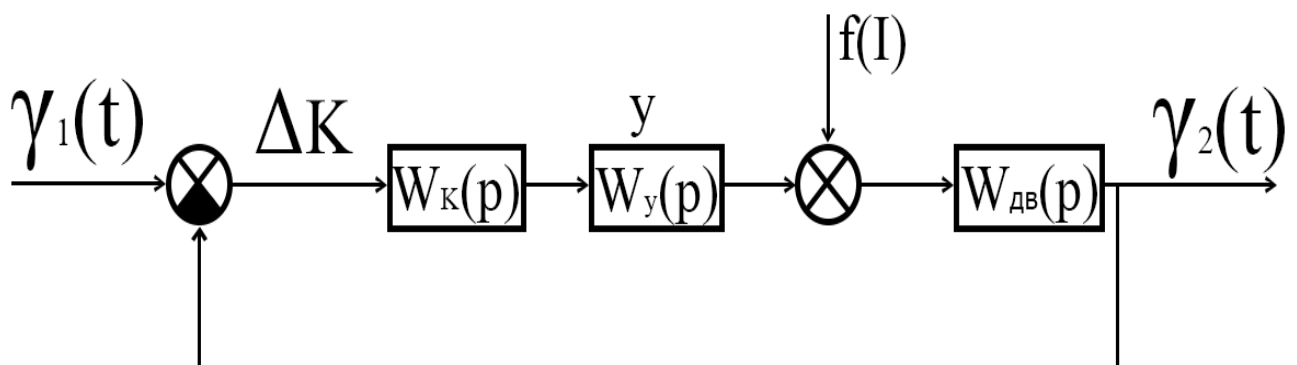


Рис. 2.2 Структурна схема слідкуючого координатора з електричним приводом

$\gamma_1(t)$ - кут між напрямком на ціль та рівносигнальним напрямком, $\gamma_2(t)$ - кут повороту антенної (оптичної) системи.

Передатну функцію координатора K , посилювача потужності Y та двигуна ДВ визначаються як:

$$W_K(p) = \frac{k_K}{T_K p + 1} \quad (2.5)$$

$$W_y(p) = \frac{k_y}{T_y p + 1} \quad (2.6)$$

$$W_{\partial\partial}(p) = \frac{k_{\partial\partial}}{(T_{\partial\partial} p + 1)p} \quad (2.7)$$

2.2. Дослідження динамічних характеристик слідкуючого координатора

Для проведення дослідження динамічних характеристик слідкуючого координатора задамо параметри системи:

$$\text{Дано: } k_K = 0,5 \frac{B}{\text{град}}, \quad k_y = 3 \frac{\text{мА}}{B}, \quad k_{\partial\partial} = 4 \frac{\text{град}}{\text{мА}}, \quad T_K = 0,05\text{с}, \quad T_y = 0,1\text{с}, \\ T_{\partial\partial} = 0,02\text{с}.$$

Для розімкненої системи передатна функція визначається як:

$$W_{\text{роз}}(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = W_K(p) \cdot W_y(p) \cdot W_{\partial\partial}(p) \quad (2.8)$$

де $Y(p) = \gamma_2(t)$ - вихідна величина, $X(p) = \gamma_1(t)$ - вхідна величина відповідно.

Коефіцієнт розімкненої системи визначається за формулою:

$$k_{\text{роз}} = k_K \cdot k_y \cdot k_{\partial\partial} = 0,5 \frac{B}{\text{град}} \cdot 3 \frac{\text{мА}}{B} \cdot 4 \frac{\text{град}}{\text{мА}} = 6.$$

Якщо підставити формули (2,5), (2,6), (2,7) у вираз (2,8) то отримаємо:

$$W_{\text{роз}} = \frac{k_{\text{роз}}}{p(T_K p + 1)(T_y p + 1)(T_{\partial\partial} p + 1)}.$$

2.2.1. Аналіз усталеної помилки

В теорії автоматичного керування точність автоматичних систем, як правило, оцінюють за усталеними помилками, тобто за помилками в усталеному режимі, який настає після завершення перехідного процесу [13].

Для того, щоб визначити усталену похибку системи в першу чергу треба визначити передатну функцію замкненої системи Φ_{Δ_K} за похибкою, яка дорівнює:

$$\Phi_{\Delta_K} = \frac{1}{1 + W_{роз}(p)} = \frac{p(T_K p + 1)(T_y p + 1)(T_{\delta} p + 1)}{p(T_K p + 1)(T_y p + 1)(T_{\delta} p + 1) + k_{роз}}.$$

Усталені похибки САК $\Delta_{уст}$ визначають, використовуючи теорему про кінцеве значення функції [13]:

$$\Delta_{уст} = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \Phi_{\Delta_K}(p) \cdot X(p)$$

$$X(p) = \gamma_1(t) = a + b \sin \omega t;$$

$$a = const = 0,7; b = 0,3; \omega = 0,5.$$

$$x_1(t) = 0,7;$$

$$x_2(t) = 0,3 \sin 0,5t.$$

Усталена похибка для $x_1(t) = 0,7$, зображення за Лапласом буде

$$X(p) = \frac{0,7}{p};$$

$$\Delta_{уст} = \lim_{p \rightarrow 0} p \frac{p(T_K p + 1)(T_y p + 1)(T_{\delta} p + 1)}{p(T_K p + 1)(T_y p + 1)(T_{\delta} p + 1) + k_{роз}} \cdot \frac{0,7}{p} = 0.$$

На вхід САК у випадку з $x_2(t)$, подається гармонічне вхідне збудження:

$$x_2(t) = 0,3 \sin 0,5t$$

В загальному вигляді гармонічне вхідне збудження визначається за виразом:

$$x(t) = A_m \sin \omega_x t$$

де A_m - амплітуда сигналу, ω_x - частота сигналу, тоді динамічна помилка також матиме гармонічний характер:

$$\delta_m(t) = \delta_m \sin(\omega_x t + \varphi_\delta),$$

де δ_m, φ_δ - відповідно амплітуда і фаза помилки.

Іноді визначають тільки амплітуду помилки δ_m . Для вхідного діяння $x(t) = A_m \sin \omega_x t$, частота якого ω_x знаходиться у смузі низьких та середніх частот, де підсилення розімкненої системи більше від одиниці, тобто [13]:

$$|W_{poz}(j\omega_x)| > 1,$$

Доцільно використовувати наближений вираз для визначення амплітуди δ_m .

Передатну функцію замкненої системи за помилкою в цьому випадку запишемо у вигляді [13]:

$$\Phi_\delta(j\omega_x) = \frac{1}{1 + W_{poz}(j\omega_x)} \approx \frac{1}{W_{poz}(j\omega_x)}.$$

Тоді амплітуда помилки δ_m визначається з виразу:

$$\delta_m = A_m |W_\delta(j\omega_x)| \approx \frac{A_m}{|W_{poz}(j\omega_x)|}.$$

$$W_{poz}(p) \approx \frac{k_{poz}}{p},$$

$$W_{poz}(j\omega_x) \approx \frac{k_{poz}}{j\omega_x} \cdot \frac{j}{j} = -j \frac{k_{poz}}{\omega},$$

$$|W_{poz}(j\omega_x)| = \frac{k_{poz}}{\omega}.$$

$$\delta_m = 0,3 \cdot \frac{\omega}{k_{poz}} \bigg|_{\omega=0,5} = \frac{0,3 \cdot 0,5}{6} = 0,025$$

Звідси динамічна помилка за гармонічним характером має вигляд:

$$\delta(t) = 0,025 \sin 0,5t$$

2.2.2 Аналіз стійкості за критерієм Гурвіца

Працездатність САК визначається стійкістю системи. Система керування, яка не є стійкою не може експлуатуватись, тому що вона не забезпечить надійного керування і може призвести до небажаних результатів і навіть до аварії об'єкта керування. Тому дослідження стійкості систем керування є одним із найважливіших завдань теорії керування і практики розробки систем керування [14]. Критерій стійкості – це певна умова, яка дозволяє визначити стійкість системи, не розв'язуючи її характеристичного рівняння. Серед критеріїв такі, що дозволяють перевірити стійкість системи шляхом розрахунків за виглядом характеристичного рівняння, а також є критерії, які дозволяють визначити стійкість системи експериментальним шляхом, за даними вимірювання частотних характеристики системи [14].

Критерій Гурвіца (Рауса-Гурвіца) формулюється наступним чином. Система є стійкою, якщо при $a_0 > 0$ всі n визначників Гурвіца більше нуля [14]. Визначники Гурвіца одержують з квадратної матриці Гурвіца:

$$\begin{pmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \dots & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & a_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{n-2} & a_n \end{pmatrix}$$

Характеристичний поліном системи записують у вигляді:

$$D(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n.$$

У такому випадку характеристичний поліном має вигляд:

$$D(p) = p(T_K p + 1)(T_y p + 1)(T_{\text{об}} p + 1) + k_{\text{роз}}.$$

Розкриваючи дужки отримаємо:

$$\begin{aligned}
 D(p) &= p(T_K p + 1)(T_y p + 1)(T_{\partial\theta} p + 1) + k_{\text{роз}} = \\
 &= p(T_K p + 1)(T_y T_{\partial\theta} p^2 + T_y p + T_{\partial\theta} p + 1) + k_{\text{роз}} = \\
 &= p(T_K T_y T_{\partial\theta} p^3 + T_K T_y p^2 + T_K T_{\partial\theta} p^2 + T_K p + T_y T_{\partial\theta} p^2 + T_y p + T_{\partial\theta} p + 1) + k_{\text{роз}} = \\
 &= T_K T_y T_{\partial\theta} p^4 + T_K T_y p^3 + T_K T_{\partial\theta} p^3 + T_K p^2 + T_y T_{\partial\theta} p^3 + T_y p^2 + T_{\partial\theta} p^2 + p + k_{\text{роз}} = \\
 &= T_K T_y T_{\partial\theta} p^4 + (T_K T_y + T_K T_{\partial\theta} + T_y T_{\partial\theta}) p^3 + (T_K + T_y + T_{\partial\theta}) p^2 + p + k_{\text{роз}}
 \end{aligned}$$

$$a_4 = T_K \cdot T_y \cdot T_{\partial\theta} = 0,05 \cdot 0,1 \cdot 0,02 = 0,0001.$$

$$a_3 = T_K \cdot T_y + T_K \cdot T_{\partial\theta} + T_y \cdot T_{\partial\theta} = 0,05 \cdot 0,1 + 0,05 \cdot 0,02 + 0,1 \cdot 0,02 = 0,026.$$

$$a_2 = T_K + T_y + T_{\partial\theta} = 0,05 + 0,1 + 0,02 = 0,17.$$

$$a_1 = 1.$$

$$a_0 = k_{\text{роз}} = 6$$

Підставивши отримані значення у характеристичний поліном маємо:

$$D(p) = 0,0001p^4 + 0,026p^3 + 0,17p^2 + p + 15$$

Визначники Гурвіца складають з матриці як квадратні діагональні матриці послідовно, як показано нижче:

$$\Delta_4 = \begin{pmatrix} a_3 & a_1 & 0 & 0 \\ a_4 & a_2 & a_0 & 0 \\ 0 & a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & a_4 & a_2 & a_0 \end{pmatrix}$$

$$\Delta_3 = \begin{pmatrix} a_3 & a_1 & 0 \\ a_4 & a_2 & a_0 \\ 0 & a_3 & a_1 \end{pmatrix} = a_3 \cdot a_2 \cdot a_1 - a_3 \cdot a_3 \cdot a_0 - a_1 \cdot a_1 \cdot a_4 =$$

$$= 0,00442 - 0,004056 - 0,0001 = 0,000264$$

$$\Delta_4 = a_0 \cdot \Delta_3 = 6 \cdot 0,000264 = 0,01584$$

$$\Delta_2 = \begin{pmatrix} a_3 & a_1 \\ a_4 & a_2 \end{pmatrix} = a_2 \cdot a_3 - a_1 \cdot a_4 =$$

$$= 0,17 \cdot 0,026 - 1 \cdot 0,0001 = 0,00432.$$

$$\Delta_1 = a_3 = 0,026$$

2.3 Моделювання слідкуючого координатора в системі Simulink

2.3.1 Реакція на функцію Хевісайда (ступінчата дія)

Для моделювання використаємо структурну схему слідкуючого координатора з електричним приводом. Моделювання проводиться у програмі MatLab в графічному середовищі імітаційного моделювання Simulink.

Побудувавши вже відому структурну схему будемо подавати на вхід системи автоматичного керування гармонічне вхідне збудження та звичайний ступінчатий сигнал, для того щоб визначити систему на стійкість та зрозуміти при яких значеннях T_y , T_k , $T_{\partial\partial}$ та k_{poz} буде біль стійка, та зазнає меншої похибки.

Для початку побудуємо перехідні характеристики системи для ступінчатого сигналу (функція Хевісайда). Для цього використаємо вхідні характеристики системи:

$$k_K = 0,5 \frac{B}{град}, k_y = 3 \frac{mA}{B}, T_K = 0,05c, T_y = 0,1c, T_{\partial\partial} = 0,02c.$$

На вхід подаємо ступінчатий сигнал зі значенням $x_1(t) = 0,7$

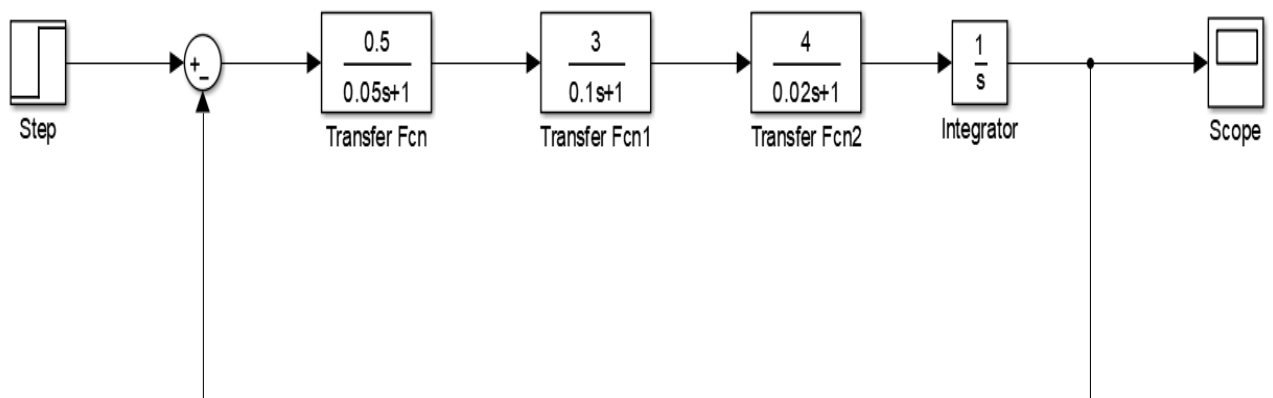


Рис.2.3 Модель системи для отримання перехідної характеристики ступінчатого сигналу.

Отримаємо графік:

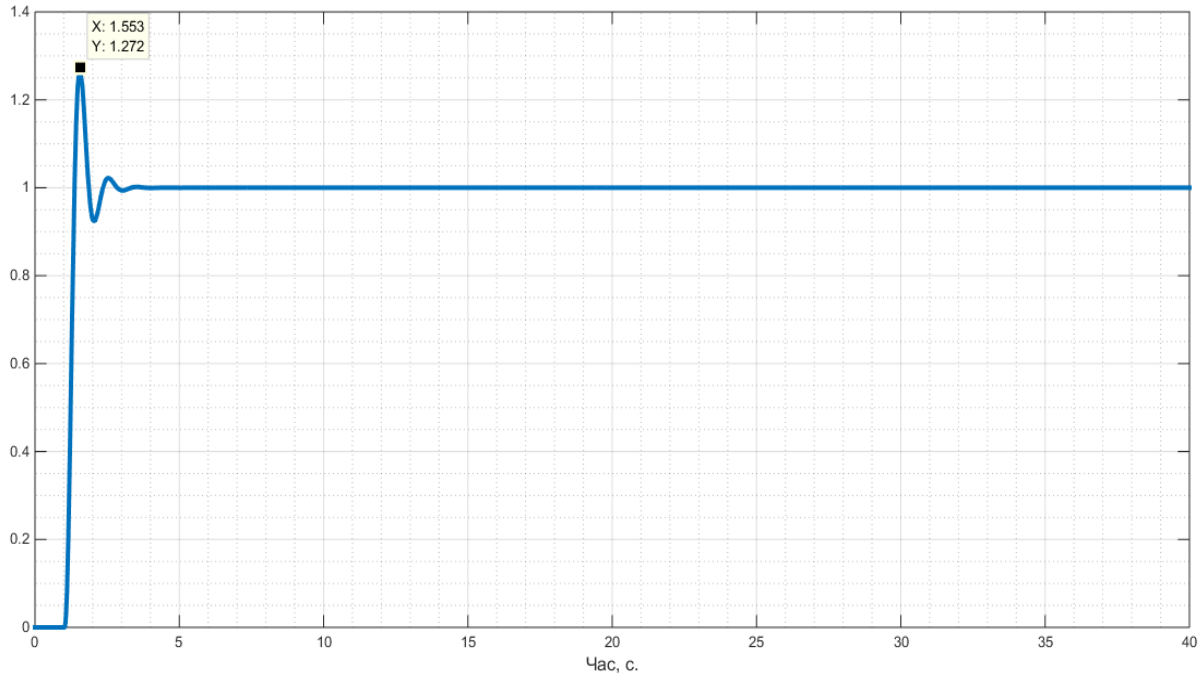


Рис. 2.4 Графік перехідної характеристики

Як видно з рисунку 2.4 час закінчення перехідного процесу дорівнює $t_p = 5c$

Значення перерегулювання складає $\sigma = 27\%$, що є в межах допустимого.

Для порівняння задамо інші вхідні значення для системи на подивимось як вона буде поводитись.

$$k_K = 1 \frac{B}{град}, k_y = 4 \frac{mA}{B}, k_{об} = 5 \frac{град}{mA}, T_K = 0,01c, T_y = 0,5c, T_{об} = 0,02c$$

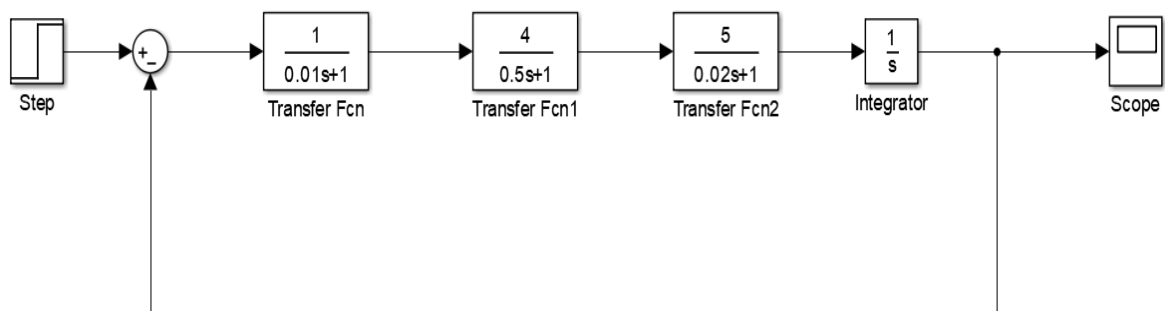


Рис.2.5 Модель системи для отримання перехідної характеристики ступінчатого сигналу.

Отримаємо графік:

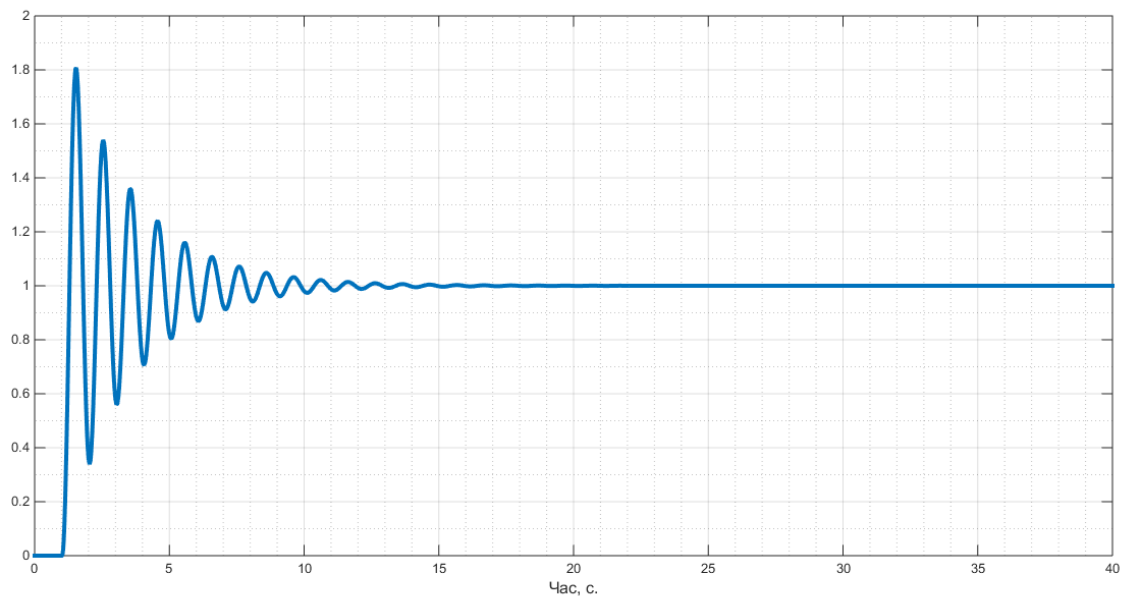


Рис.2.6 Графік перехідної характеристики

Як видно з рисунку 2.6, збільшення вхідних значень системи значно вплинуло на графік перехідної характеристики. Адже час закінчення перехідного процесу складає $t_p = 20\text{с}$, що в 4 рази більше ніж при початкових значеннях. Перерегулювання складає $\sigma = 80\%$, що є перевищення норми і система не є стабільною.

2.3.2 Реакція на гармонічне збурення

Для моделювання у Simulink використаємо ту ж саму систему з тими значеннями які використовувалися для дослідження ступінчатого вхідного сигналу, та визначимо поведінку вихідного сигналу.

Запишемо вхідні характеристики:

$$k_K = 0,5 \frac{B}{\text{град}}, k_y = 3 \frac{mA}{B}, k_{\text{ов}} = 4 \frac{\text{град}}{mA}, T_K = 0,05\text{с}, T_y = 0,1\text{с}, T_{\text{ов}} = 0,02\text{с}.$$

Після цього подаємо синусоїдальний сигнал зі значенням $A_m = 0,3$ та $\omega_x = 0,5$

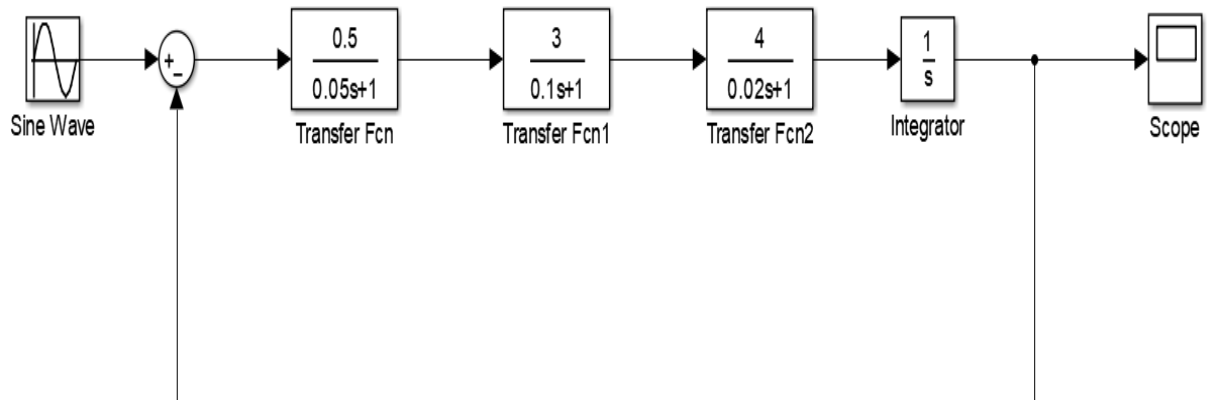


Рис.2.7 Модель системи для отримання гармонічного вихідного сигналу

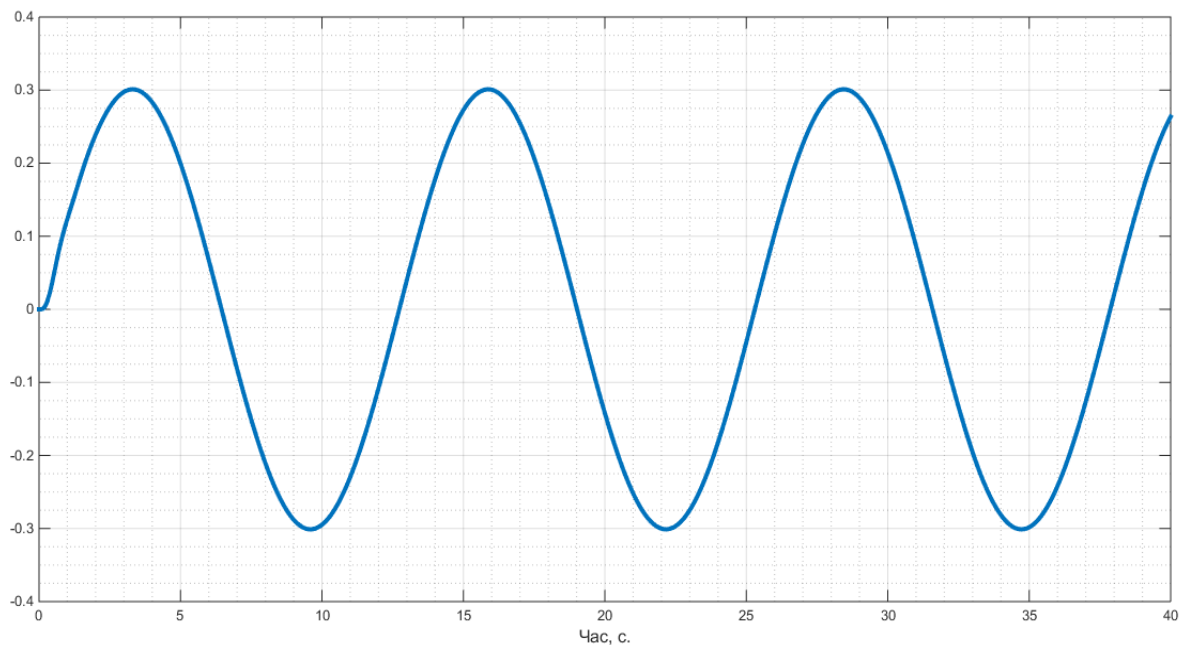


Рис.2.8 Графік гармонічного збудження

Для порівняння задамо інші вхідні значення для системи на подивимось як вона буде поводитись.

$$k_K = 1 \frac{B}{град}, k_y = 4 \frac{mA}{B}, k_{\partial\partial} = 5 \frac{град}{mA}, T_K = 0,01c, T_y = 0,5c, T_{\partial\partial} = 0,02c$$

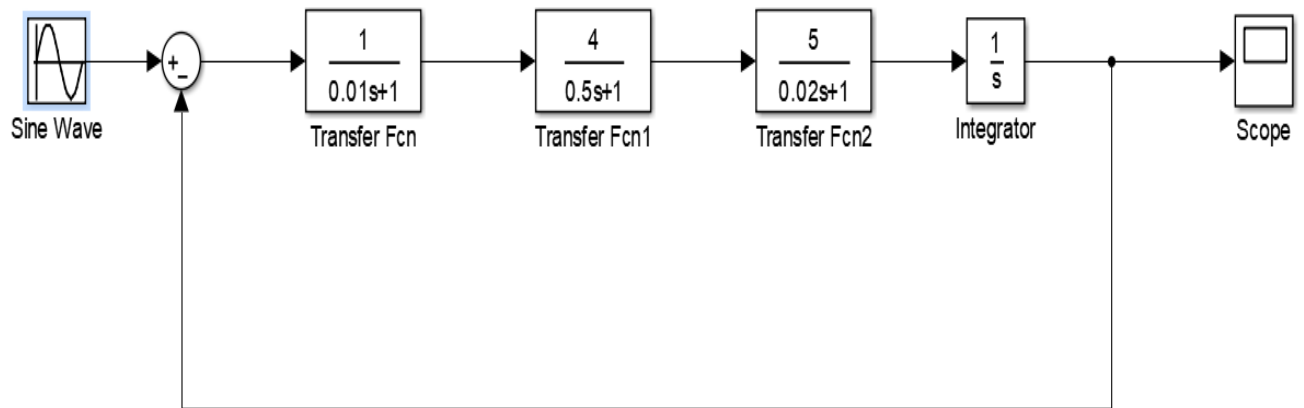


Рис.2.9 Модель системи для отримання гармонічного вихідного сигналу

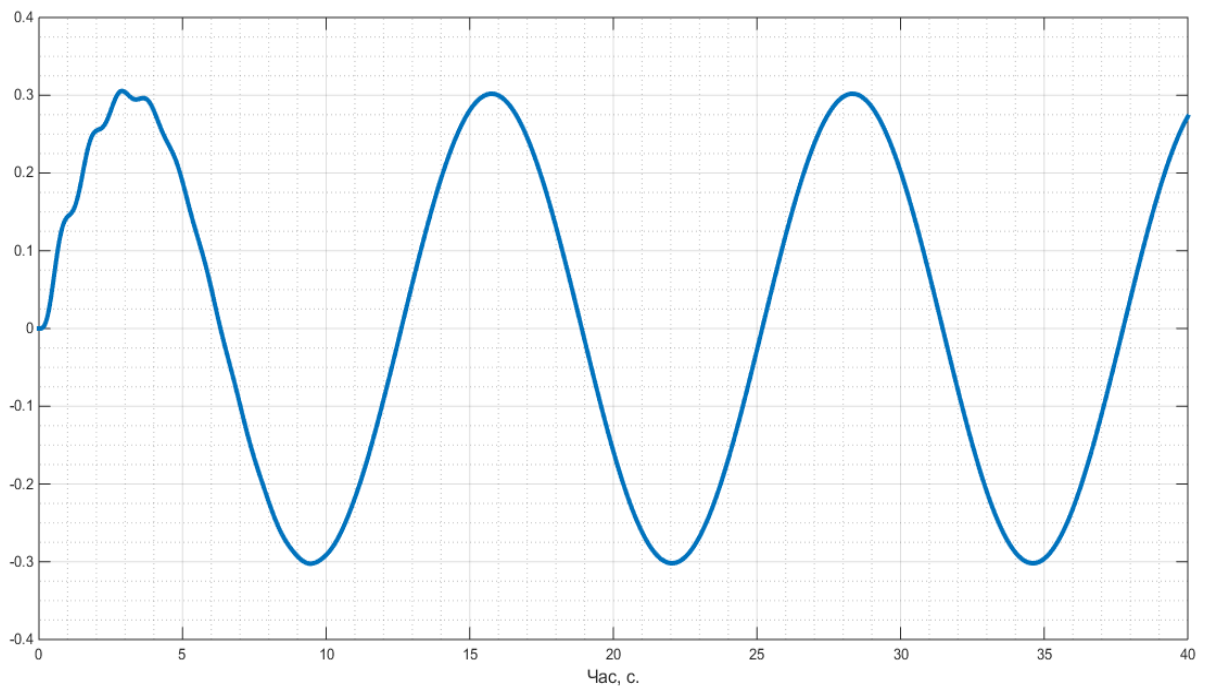


Рис.2.10 Графік гармонічного збудження

Як видно з рисунків 2.8 та 2.10 графіки є майже однакові, це свідчить про те, що змінюючи вхідні значення для системи це не дуже сильно повпливає на вихідний сигнал. Можливо, якщо задати занадто великі значення, то синусоїда зазнає сильних змін, але з цього буде лише один висновок, система не буде нестійкою.

2.3.3 Побудова логарифмічних частотних характеристик розімкненої системи.

За допомогою програмного забезпечення MatLab, а саме графічного імітаційного середовища Simulink було побудовано логарифмічні частотні характеристики системи: логарифмічна амплітудно-частотна характеристика та логарифмічна фазо-частотна характеристика.

Для цього було побудовано розімкнену структурну схему слідкуючої системи з вхідним значенням ступінчатої функції. Дані для перехідних функцій використовували початкові.

Запишемо вхідні характеристики:

$$k_K = 0,5 \frac{B}{град}, k_y = 3 \frac{mA}{B}, k_{\partial\partial} = 4 \frac{град}{mA}, T_K = 0,05c, T_y = 0,1c, T_{\partial\partial} = 0,02c.$$

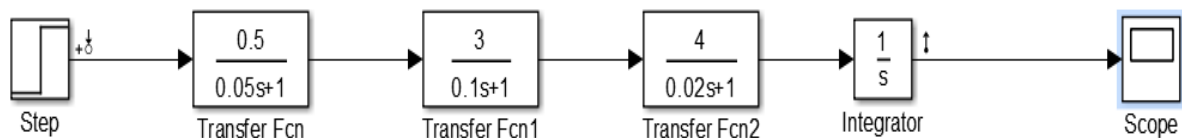


Рис. 2.11 Структурна схема розімкненої системи

Було отримано ЛАЧХ та ЛФЧХ:

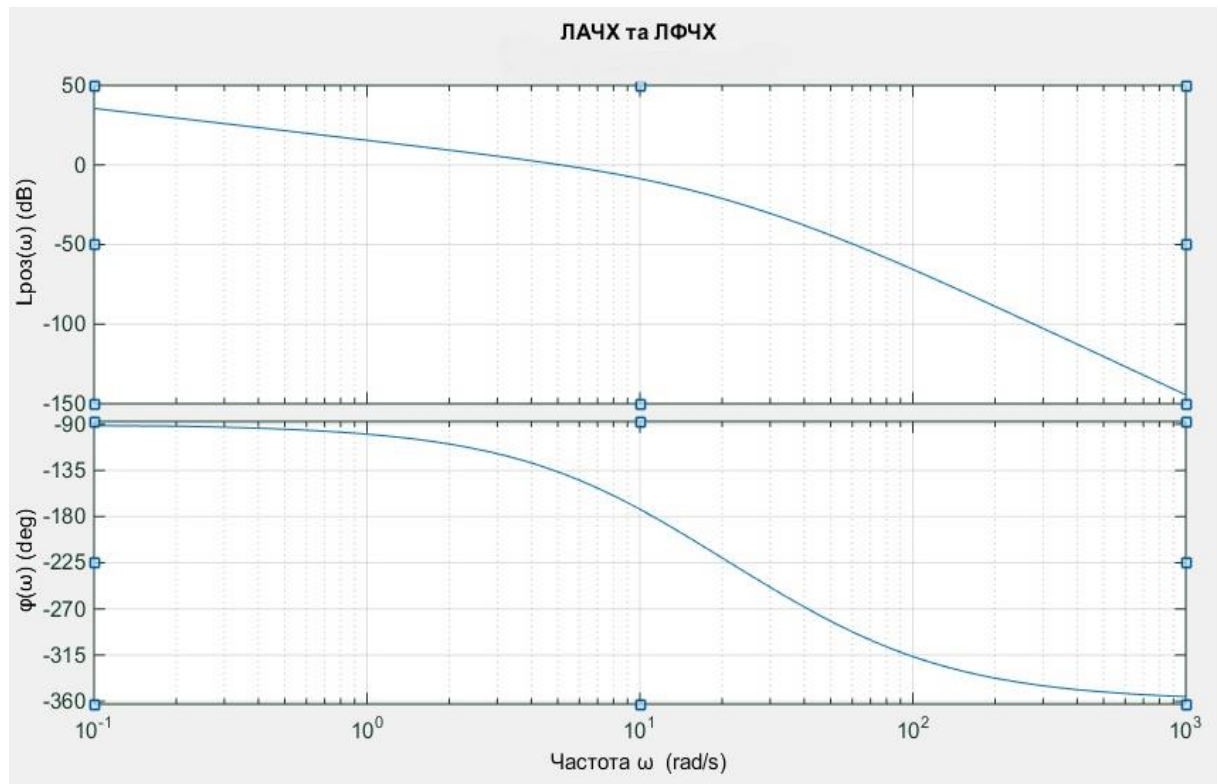


Рис. 2.12 Логарифмічні частотні характеристики системи

З рисунку 2.12 визначено, що частота зрізу дорівнює 50с^{-1} а запас стійкості по фазі дорівнює 45° , що є задовільним значенням.

2.3.4 Дослідження слідкуючого координатора з зоною нечутливості.

Вигляд нелінійної характеристики типу «зона нечутливості+насичення» та її аналітичний запис представлені на рисунку 2.15. На рисунку k - коефіцієнт нахилу, S - рівень насичення, c_1, c_2 - значення абсциси точок перегину [15].

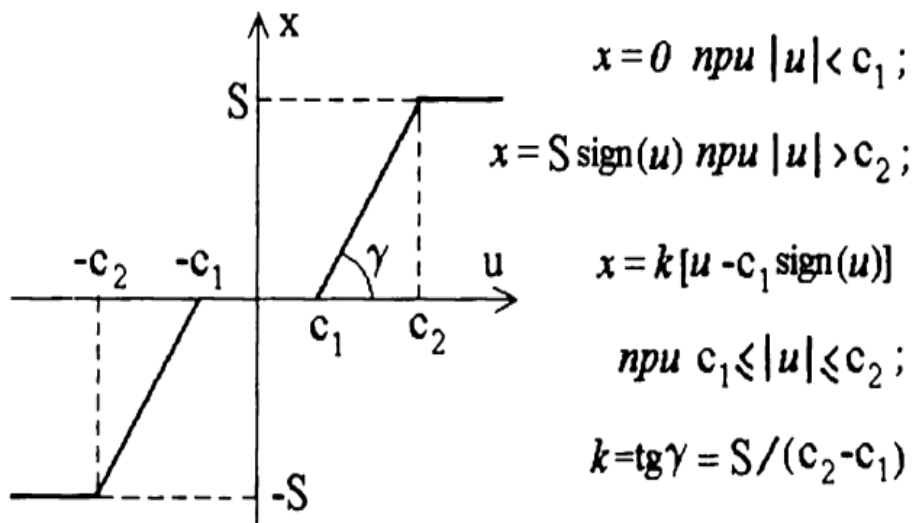


Рис.2.13 Нелінійна характеристика типу «зона нечутливості+насичення»

З урахуванням насичення, зони нечутливості та запізнювання в гідравлічних двигунах структурна схема кожного каналу слідкуючого координатора з гідродвигунами може бути представлена у вигляді [15], зображеному на рисунку 2.14.

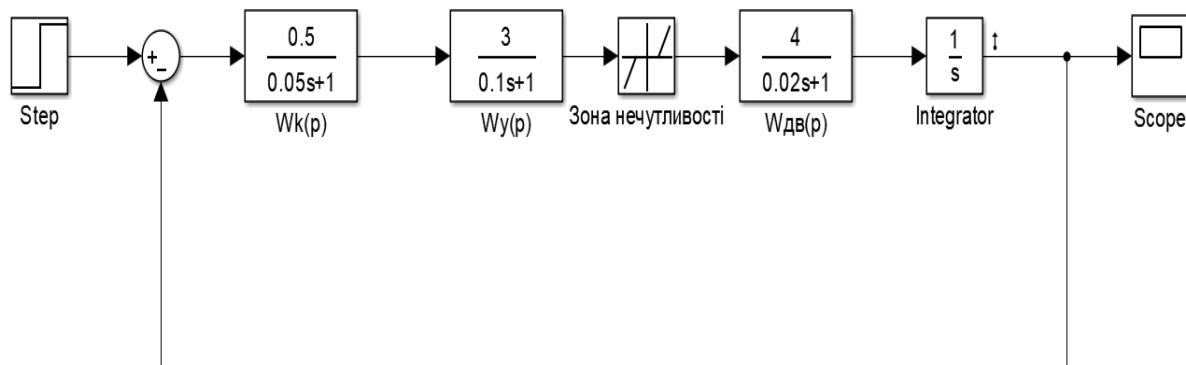


Рис.2.14 Структурна схема слідкуючого координатору з зоною нечутливості

Для зони нечутливості використали значення $c_1 = \pm 0,1$ та вхідні значення для структурної схеми $k_K = 0,5 \frac{B}{\text{град}}$, $k_y = 3 \frac{\text{мА}}{B}$, $k_{\text{дв}} = 4 \frac{\text{град}}{\text{мА}}$, $T_K = 0,05\text{с}$, $T_y = 0,1\text{с}$, $T_{\text{дв}} = 0,02\text{с}$.

Отримаємо графік з вихідним сигналом при використанні блоку в структурній схемі з зоною нечутливості:

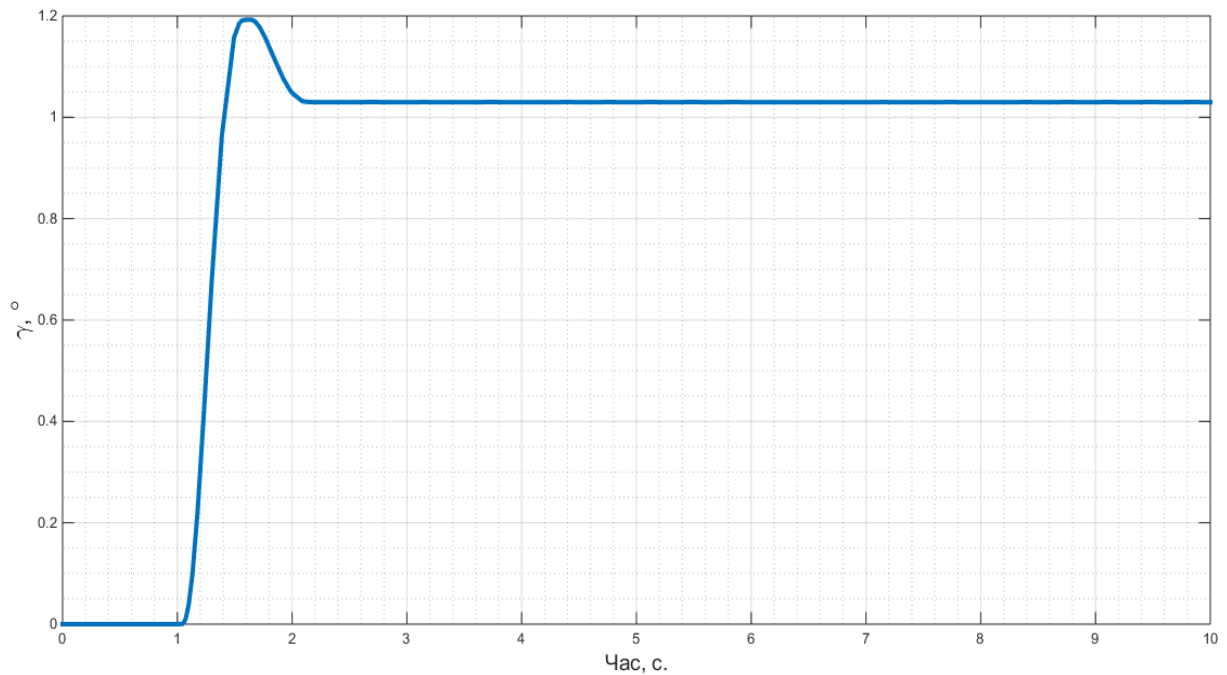


Рис.2.15 Вигляд нелінійної характеристики з зоною нечутливості $c_1 = \pm 0,1$

На рисунку 2.15 ми можемо бачити, що з використанням функції зони нечутливості сигнал розташований вище позначки 1, ніж це було без цієї функції на рисунках вище. Це означає, що присутня похибка у встановленому режимі. Для того, щоб усунути виявлену похибку зазвичай встановлюють ПД-регулятор, або цифровий нечіткий регулятор (НР).

Для експерименту візьмемо цю ж структурну схему але з більшим діапазоном зони нечутливості $c_1 = \pm 0,5$, та перевіримо на значення похибки в усталеному режимі, отримаємо такий графік:

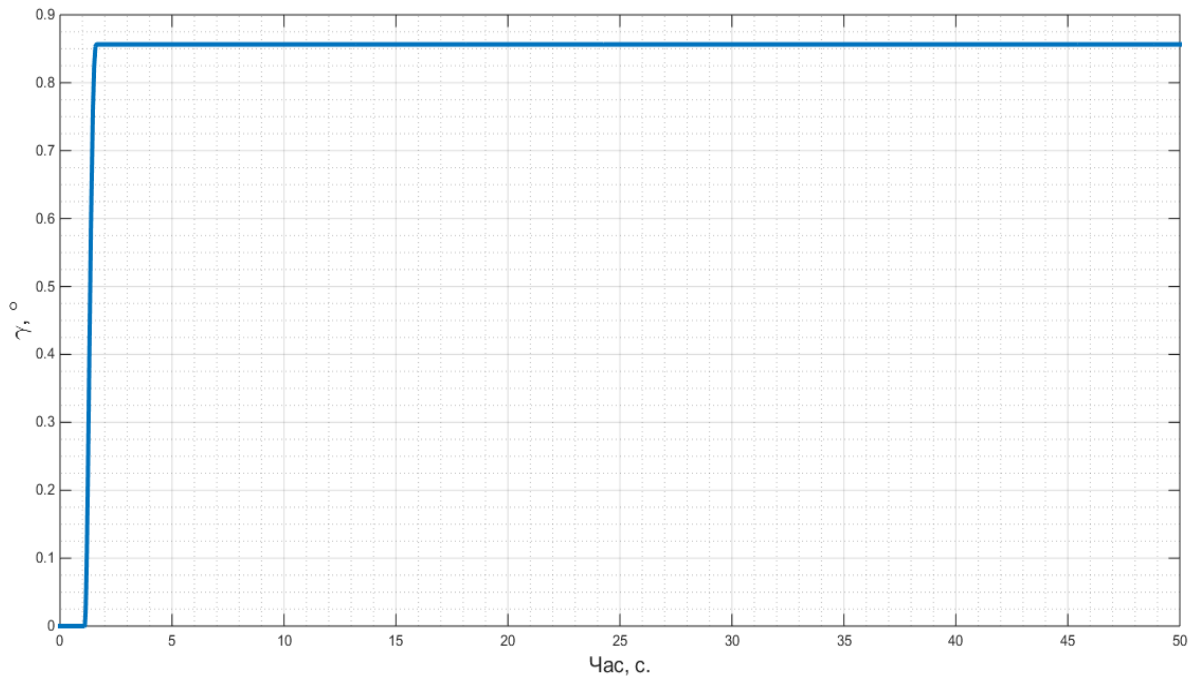


Рис. 2.16 Вигляд нелінійної характеристики з зоною нечутливості $c_1 = \pm 0,5$

По графіку видно, що при збільшенні зони нечутливості сигнал буде знаходитися нижче встановленого положення яке було отримано в графіку 2.4. Тобто, збільшується зона нечутливості, збільшується похибка у встановленому режимі. Якщо ж діапазон зони нечутливості зменшувати, то і похибка буде майже непомітною.

Дослідимо значення з зоною нечутливості якщо на вхід подати не ступінчатий сигнал, а синусоїдальний. Подамо синусоїдальний сигнал зі значенням $A_m = 0,3$ та $\omega_x = 0,5$ та зоною нечутливості $c_1 = \pm 0,1$, отримаємо графік:

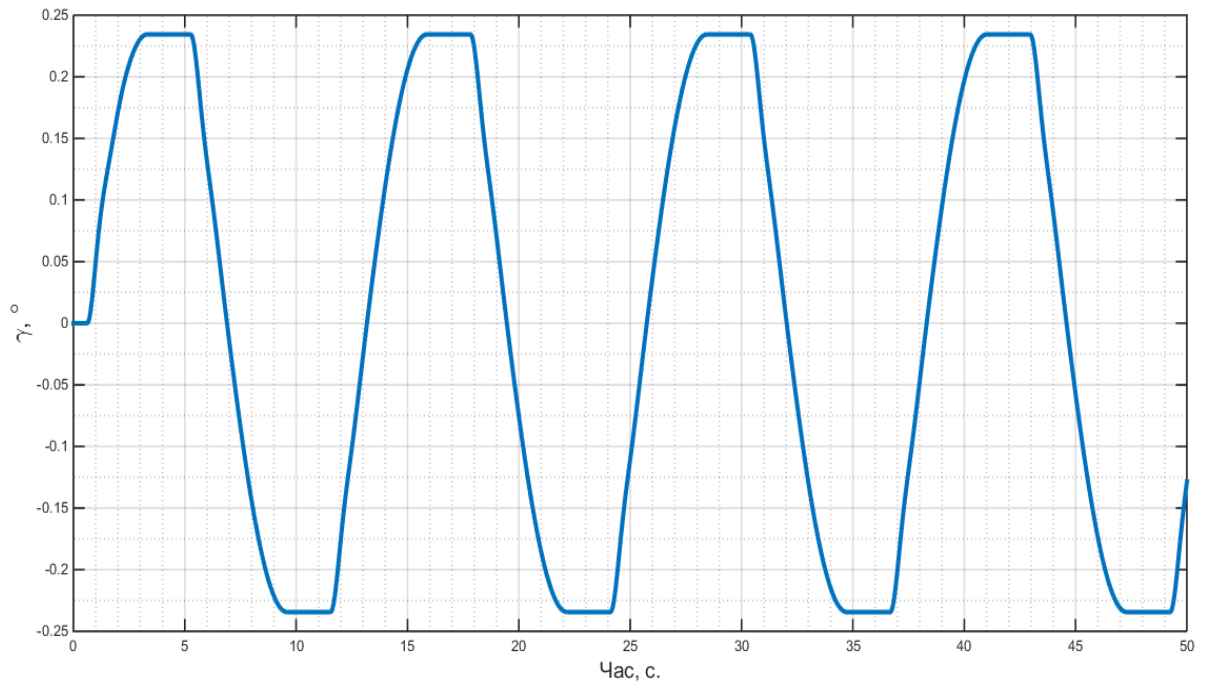


Рис.2.17 Зона нечутливості при гармонічному збудженні, $c_1 = \pm 0,1$

На рисунку 2.17 видно, що коли присутня зона нечутливості, у вершинах синусоїди виникає застій, при збільшенні діапазону c_1 цей застій буде відповідно збільшуватись

Висновки до розділу 2

В даному розділі було описано загальну характеристику слідкуючого координатора та обрано структурну модель. Проведено дослідження динамічних характеристик слідкуючого координатора. Визначено аналіз усталеної похибки за вхідним ступінчастим сигналом та синусоїдальним сигналом (дослідження на гармонічне вхідне збудження). Проведено аналіз стійкості за критерієм Гурвіца. Було змодельовано структурну схему слідкуючого координатора в системі Simulink, виведено графіки при вхідному діянні ступінчатого сигналу та синусоїдальному, та побудовано логарифмічно частотну характеристику розімкненої системи. Досліджено слідкуючий координатор з зоною нечутливості.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИФРОВОГО НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА У СЛІДКУЮЧОМУ КООРДИНАТОРІ

3.1 Функціональна та структурна схеми системи керування на базі нечіткої логіки.

В даний час триває збільшення питомої ваги систем управління з цифровою реалізацією регуляторів. До регуляторам, орієнтованим на цифрову реалізацію відносяться, зокрема, так звані нечіткі регулятори [15]. Про зростання інтересу до нечітким регуляторам свідчить поява значного числа публікацій, присвячених їх практичного застосування в системах регулювання. Область практичного використання принципів нечіткої логіки даний час досить велика. Розглянемо нечіткі регулятори, які можуть бути включені в контур систем регулювання замість традиційних (наприклад ПІД) регуляторів [15].

Функціональна схема системи автоматичного управління на базі нечіткої логіки (системи управління з нечітким регулятором або системи фаззи-управління) приведена на рисунку 3.1 [15].

Схема складається з пристрою порівняння, нечіткого регулятора НР, об'єкта управління ОУ і ланцюга зворотного зв'язі. Нечіткий регулятор (фаззи-регулятор) включає три основні блоки - блок фазифікації, блок формування логічного рішення і блок дефазифікації [15].

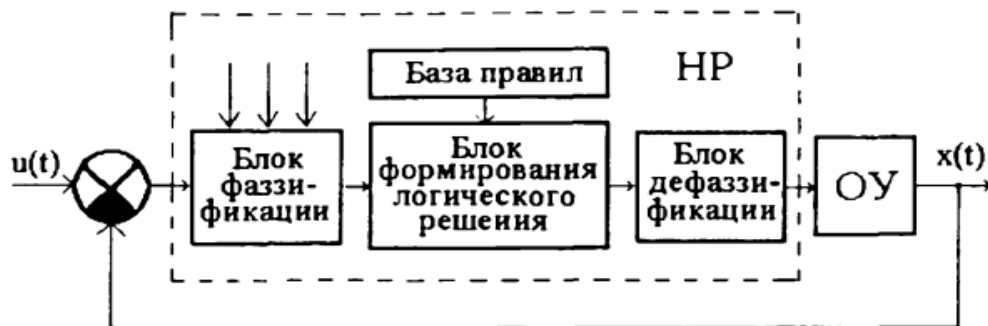


Рис. 3.1 Функціональна схема системи автоматичного управління на базі нечіткої логіки

У блоці фазифікації вхідні лінгвістичні змінні x_i , $i = 1, n$, такі як помилка системи θ , швидкість зміни (перша похідна) помилки $\dot{\theta}$, прискорення (друга похідна) помилки $\ddot{\theta}$, якість характеризується терм-множини (лінгвістичними величинами) a_i^j , такими як негативна (О), негативна середня (ОС), негативно мала (ОМ), нульова (Н), позитивно мала (ПМ), положительно середня (ПС), позитивна (П), які описуються на універсальній безлічі U функціями належності ФП $\mu(u)$ [15]. ФП визначає ступінь приналежності кожного елемента u безлічі U числом між 0 і 1, яке називають ступенем істинності даної лінгвістичної змінної даного терму. Діапазони зміни вхідних змінних, наприклад, $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$, $[\dot{\theta}_{\min}, \dot{\theta}_{\max}]$, $[\ddot{\theta}_{\min}, \ddot{\theta}_{\max}]$, і поточні значення вхідних змінних перераховуються (відображаються) на єдину універсальну множину $U_i = [0, L_i - 1]$, де L_i - число, відповідне кількості термів кожної лінгвістичної змінної x_i , $i = 1, n$, або на універсальну множину $U = [0, 1]$ [15]. Як правило, кількість термів j для кожної лінгвістичної змінної вибирається одним і тим же. Таким чином, для кожного поточного значення вхідної змінної визначається ступінь приналежності (величина істинності) до тих термів (нечітким підмножини), які характеризують конкретну лінгвістичну змінну. Оскільки ФП зазвичай перекривають один одного, то для однієї і тієї ж вхідної змінної кілька ФП можуть повідомляти різні величини істинності, що відрізняються від нуля. У блоці формування логічного рішення на основі матриці знань (бази правил) записуються лінгвістичні правила виду ЯКЩО (вихідна ситуація), ТО (відповідна реакція), які разом зазвичай називають робочим правилом. Взаємодія між вхідними та вихідними ФП типу ЯКЩО-ТО позначається як імплікація (логічна зв'язка) [15]. Імплікація (активізація) - це етап нечіткого виведення, що представляє собою процедуру знаходження ступеня істинності кожного з підзаключених логічних правил виду ЯКЩО-ТО, які є нечіткими лінгвістичними висловлюваннями в формі лінгвістичних змінних. Частина ЯКЩО (передумови або умови) означає поєднання логічних операцій, а частість ТО (рішення, висновки, висновки) зазвичай є просте зазначення лінгвістичної величини для вихідного впливу (керуючого впливу на об'єкт управління) нечіткого регулятора. Відповідним формулюванням правил

досягається результат, при якому для будь-якої лінгвістичної величини керуючого впливу, як мінімум, одне з правил виявляється прийнятним [15]. Найбільш часто використовується "мінімаксний" метод логічного рішення, коли спочатку ФП частини ТО кожного з правил об'єднуються з величиною істинності частини ЯКЩО (при цьому ФП частини ТО обмежується величиною істинності частини ЯКЩО - це "міні" - операція), а потім з обмежених ФП частини ТО шляхом взаємного накладення вибирається результуюча ФП з максимальною величиною істинності ("максі" - операція "). Ця результуюча ФП визначає собою поточний вплив бази правил. Процедура обробки бази правил формуванням результуючої ФП перед ставлять собою логічне рішення для розрахунку вихідної величини НР [15]. Нечіткий висновок займає центральне місце в нечіткій логіці і системах нечіткого управління. Процес нечіткого виведення являє собою деяку процедуру або алгоритм отримання нечітких висновків на основі нечітких умов або передумов з іспользованим понятій нечіткої логіки [15]. Цей процес поєднує в собі всі основні концепції теорії нечітких множин: функції приналежності, лінгвістичні змінні, нечіткі операції, методи нечіткої імплікації і нечітку композиції. Слід підкреслити, що як операцію імплікації (логічного зв'язки), так і операцію композиції (згортки) в алгебрі нечітких множин можна реалізувати по різному (при цьому підсумковий результат теж буде різним), але в будь-якому випадку загальний логічний вивід здійснюється за наступні чотири етапи [16].

1. Визначення нечіткості (фазифікації). Задаються функції приналежності на єдиному універсальному просторі для термів вхідних лінгвістичних змінних і для конкретних значень змінних визначаються ступеня істинності кожної передумови кожного правила.

2. Логічний висновок. Попередньо обчислені значення істинності для передумов кожного правила застосовуються до висновків (висновків) кожного правила. У качестве правил логічного висновку зазвичай використовуються тільки операції \min (мінімум) або prod (множення). У логічному висновку МІН функція приналежності виведення "відсікається" по висоті, що відповідає обчислювальній ступеня істинності передумови правила (нечітка логіка "І"). У логічному висновку

prod функції приналежності виведення масштабуються обчислювальними величинами творів ступенів істинності передумов кожного правила.

3. Композиція. Отримані нечіткі підмножини ("усічені по висоті" функції приналежності) об'єднуються разом для формування одного нечіткого підмножини (результуючої функції належності) для змінної виводу (рішення). Для об'єднання зазвичай використовуються операції *max* (максимум) або *sum* (сума). При композиції *max* результуюча нечітка підмножина конструюється як поточковий максимум за всіма отриманими нечітким підмножини (нечітка логіка "АБО"). При композиції *sum*-результуюча нечітка підмножина конструюється як поточкова сума за всіма отриманими нечіткими підмножинами.

4. Приведення до чіткості (дефазифікація). Нечіткий вивід перетворюється в чітке число.

У блоці дефазифікації отримана результуюча функція належності для керуючого впливу на об'єкт управління перетворюється в числову величину, як правило, методом визначення "центру ваги" площині *S* результуючої фігури, що лежить під графіком результуючої ФП [15].

3.2 Огляд алгоритму Мамдані для нечіткого виводу

На практиці використовується декілька алгоритмів нечіткого виводу. Один з основних є алгоритм Мамдані (запропонований в 1957 році англійським математиком Ebrahim Mamdani [17,18]), який використовується в інтерактивній системі MatLab, для простоти вважаючи, що базу знань організують два нечітких правила (по числу термів) виду:

Якщо $(u_1 = a_1^1)$ і $(u_2 = a_2^1)$, то $(u_c = a_c^1)$;

Якщо $(u_1 = a_1^2)$ і $(u_2 = a_2^2)$, то $(u_c = a_c^2)$;

де u_i - поточні значення вхідних змінних, перераховані на єдину універсальну множину, $(i = \overline{1,2})$, а a_i^j - лінгвістичні оцінки (терм-множини, назви) вхідних змінних, наприклад, $a_i^j \in \{\text{негативна}(j=1), \text{позитивна}(j=2)\}$. a_c^j - лінгвістична оцінка поточної вихідної змінної u_c на єдиній універсальній множині.

u_c^* - чітке значення вихідної змінної, яке треба визначити на основі наведеної інформації та відомих чітких значень вхідних змінних u_1^*, u_2^* . $\mu^j(u)$ - задані функції приналежності для змінних ($j = \overline{1,2}$).

Алгоритм Мамдані математично описується наступним чином [15].

1. Нечіткість (процедура фаззифікації – fuzzyfication): знаходяться степені істинності для передумови чи умом (вхідних змінних) кожного правила:

$$\mu^1(u_1^*), \mu^2(u_1^*), \mu^1(u_2^*), \mu^2(u_2^*),$$

де $\mu^1(u_1), \mu^2(u_1)$ - функції приналежності для змінної u_1 .

$\mu^1(u_2), \mu^2(u_2)$ - функції приналежності для змінної u_2 .

2. Нечіткий вивід: знаходяться рівні «відсікання» (ступені істинності) для передумов або умов кожного з правил (процедура агрегування – aggregation):

$$\left. \begin{aligned} A &= \mu^1(u_1^*) \wedge \mu^1(u_2^*); \\ B &= \mu^2(u_1^*) \wedge \mu^2(u_2^*), \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

де через « \wedge » позначена операція логічного мінімуму (min); потім знаходять відсічені функції приналежності для змінної виводу або заключення – вихідної змінної u_c (процедура активізації – activation):

$$\left. \begin{aligned} \mu_c^1(u) &= A \wedge \mu^1(u_c); \\ \mu_c^2(u) &= B \wedge \mu^2(u_c), \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

де $\mu^1(u_c), \mu^2(u_c)$ - функції приналежності для змінної u_c .

3. Композиція (процедура акумуляції – accumulation): здійснюється об'єднання знайдених відсічених функцій, в результаті чого отримуємо підсумкову нечітку множину для змінної входу з результуючою функцією приналежності:

$$\mu_c(u) = \mu_c^1(u) \vee \mu_c^2(u) \quad (3.3)$$

де через « \vee » позначена операція логічного максимуму (max).

4. Приведення до чіткості (процедура дефаззифікації – defuzzification): знаходження чіткого значення вихідної змінної u_c^* , наприклад центроїдним методом.

Алгоритм Мамдані, використовуючий формули (3.1)-(3.3), називається «мінімаксім» методом нечіткого виводу. Цей алгоритм найбільше широко використовується на практиці. Є багато модифікацій цього алгоритму [19].

В алгоритмі нечіткого виводу Мамдані основними етапами є формування бази правил, фазифікація входніх змінних, агрегування підумов в нечітких правилах, активізація підзаключень та акумуляція (композиція) заключень нечітких правил [15].

Нечіткий регулятор НР практично реалізується в мікроЕОМ (або мікропроцесорі) і працює в дискретному режимі, тому система автоматичного керування з нечітким регулятором має пристрій сполучення мікроЕОМ з об'єктом керування – аналого-цифровий перетворювач АЦП та цифроаналоговий перетворювач ЦАП (див. рис.3.1 на якому показана структурна схема системи керування нечітким регулятором) [15].

АЦП квантує безперервну помилку $\theta(t) = u(t) - x(t)$ з кроком квантування h . В якості першої і другої похідних від помилки зазвичай обчислюють першу та другу різницю по формулам [15]:

$$\dot{\theta}(k) = [\theta(k) - \theta(k-1)] / h;$$

$$\ddot{\theta}(k) = [\dot{\theta}(k) - \dot{\theta}(k-1)] / h = [\theta(k) - 2\theta(k-1) + \theta(k-2)] / h^2,$$

де $\theta(k)$ - квантована помилка на виході АЦП. ЦАП являє собою, як правило, фіксатор нульового порядку з передатною функцією $H(p) = (1 - e^{-hp}) / p$. [15]

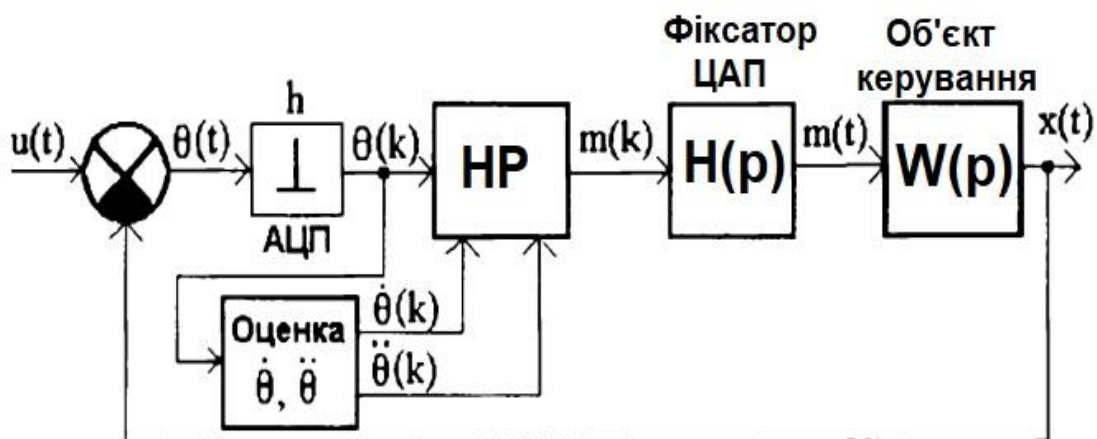


Рис.3.2 Структурна схема системи керування з нечітким регулятором

3.3 Дослідження синтезу нечіткого регулятора системи керування об'єктом з нелінійністю типу «зона нечутливості+насичення». [20]

Відзначимо деякі особливості нечіткого регулятора. НР працює в дискретному режимі, тому на кожному кроці квантова АШ він повинен виконати всі необхідні обчислення [15]. НР обробляє всі вхідні змінні, тому на нього можна подавати додаткові змінні, що характеризують процеси в об'єкті управління, і тим самим забезпечити більш широке впливу на динаміку управління. Система з НР зазвичай стійка щодо змін параметрів об'єкта управління, що пов'язано з нечіткою природою правил функціонування. Традиційні методи опису регуляторів, наприклад, за допомогою передавальних функцій, для НР не підходять і не потрібні. НР є нелінійним і його особливістю є відсутність динаміки в самому НР [15]. Відсутність "пам'яті" і процедура проектування, а так же словесний опис процесу управління, що характеризується лінгвістичними правилами, є головними особливостями НР. Нечіткі регулятори представляють інтерес в першу чергу для управління об'єктами, які або не піддаються, або піддаються з великими труднощами формалізованого опису, але навіть стосовно управління об'єктами, для яких отримані математичні моделі, ці регулятори часто найкращим за всі інші, так як дозволяють отримати більш високу якість (менше помилки в перехідних і сталих режимах) систем автоматичного управління [15]. Оскільки алгоритми управління на базі нечіткої логіки можуть бути реалізовані тільки з використанням ЕОМ, то система автоматичного управління з нечітким регулятором є цифровий. Найважливішою характеристикою цифрової системи управління є крок квантування миттєвого ключа h (інтервал дискретизації аналогового сігнала). Значення h багато в чому визначає значення інших параметрів цифрової системи автоматичного управління, зокрема, параметрів традиційних цифрових регуляторів. Тому при проектуванні систем управління з нечіткими регуляторами необхідно приділяти увагу вибору значення кроку квантування h . При формуванні структурних схем систем управління з нечіткими регуляторами важливим є вибір вхідних параметрів нечіткого регулятора. Лінгвістичні правила керування самі по

собі не можуть бути реалізовані в сучасних ЕОМ. Необхідна процедура їх формалізації. У зв'язку з цим дуже важливим є завдання вибору методу формалізації експертних знань [15]. Оскільки нечіткі множини формалізуються за допомогою функцій приналежності важливу роль відіграє вибір їх виду і параметрів. При реалізації нечіткого управління в сучасних ЕОМ необхідно ставити конкретні значення параметрів функцій приналежності, в першу чергу межі їх зміни. Тому важлива методика параметричної настройки нечіткого регулятора [15]. Розглянемо структурну схему системи для загального випадку (рис. 3.3), в якій об'єктом керування є посилювач та двигун. Математична модель посилювача та двигуна описується послідовним з'єднанням нелінійності Н типу «зона нечутливості+насичення» та лінійною частиною [20] з передатною функцією

$$W(p) = \frac{1}{\alpha[p(p+b)]}, \text{ де } b = 1/T, \alpha = bK.$$

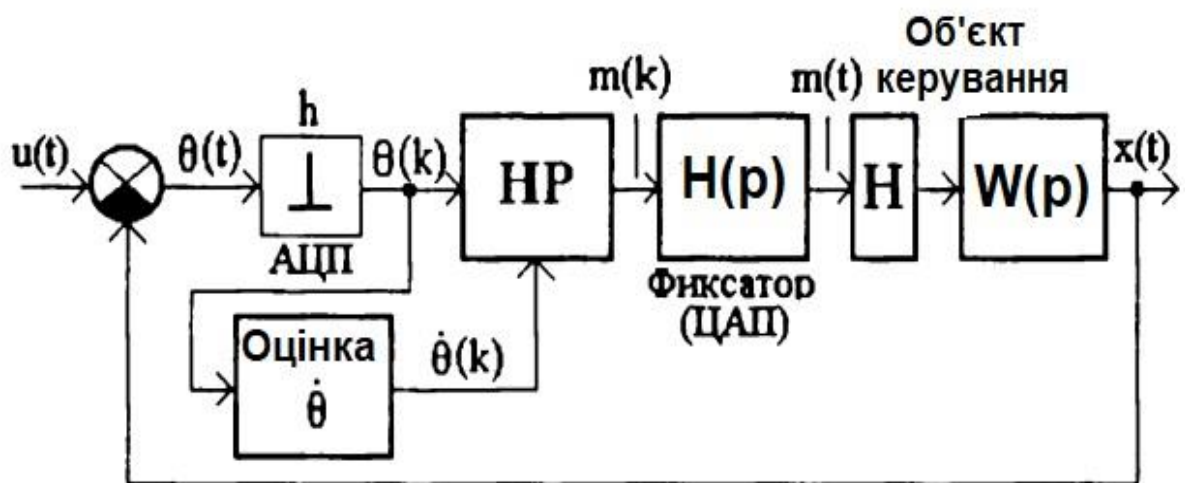
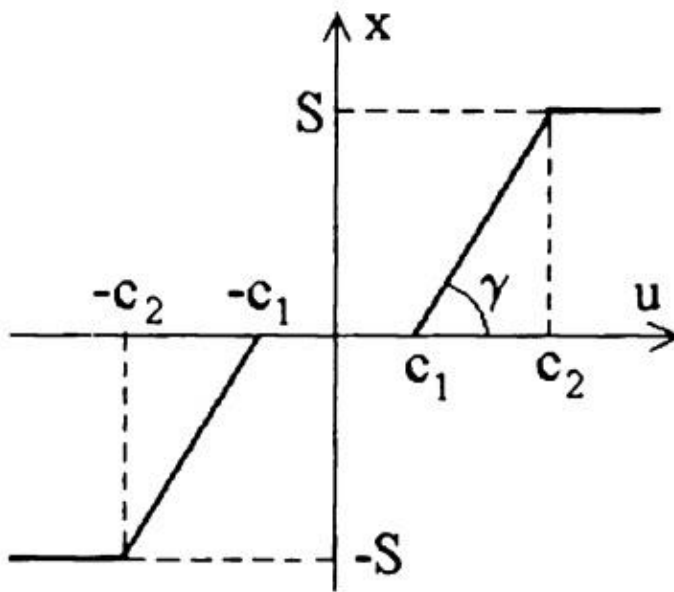


Рис.3.3 Структурна схема системи з нечітким регулятором та нелінійністю

Вид нелінійності характеристики типу «зона нечутливості+насичення» та її аналітичний запис представлено на рис. 3.4. На рисунку k - коефіцієнт нахилу, S - рівень насичення, c_1, c_2 - значення абсциси точок перегину [20].



$$\mu(x) = \begin{cases} x = 0, |u| < c_1; \\ x = S \operatorname{sign}(u), |u| > c_2; \\ x = k[u - c_1 \operatorname{sign}(u)], c_1 \leq |u| \leq c_2; \\ k = \operatorname{tg} \gamma = S / (c_2 - c_1) \end{cases}$$

Рис. 3.4 Вид нелінійності та її аналітичний запис

Визначимо реакцію системи на одиничний ступінчатий вплив методом математичного моделювання при наступних параметрах об'єкту керування: $b = 10$ 1/с, $\alpha = 1000$ 1/с² (коефіцієнт передачі $K = 100$ 1/с, постійна часу $T = 0,1$ с). Нелінійність характеризується наступними параметрами $k = 1$; $c_1 = 0,1$; $c_2 = 0,9$; $S = 0,8$. Крок квантування (інтервал надходження даних в нечіткий регулятор) $h = 0,01$ с. Крок моделювання $h_0 = 0,0005$ с [20].

Діапазони змінення вхідних і вихідних параметрів нечіткого регулятора НР (обираються при проектуванні НР та уточнюються шляхом математичного моделювання з ціллю отримання прийнятих показників якості перехідного процесу в замкненій системі): $[\theta_{\min}, \theta_{\max}] = [-1, 1]$, $[\dot{\theta}_{\min}, \dot{\theta}_{\max}] = [-20,44, 20,44]$, та $[m_{\min}, m_{\max}] = [-10, 10]$.

Моделювання нелінійності Н типу «зона нечутливості + насичення» проведено у відповідності до алгоритму на рис. 3.5 [20].

На рис. 3.6 представлена реакція замкненої системи: а – без нечіткого регулятора (нескорегована система); б – з нечітким регулятором (скорегована система).

Застосування нечіткого регулятора дає можливість значно покращити перехідний процес системи та зменшує похибку в усталеному режимі [20].

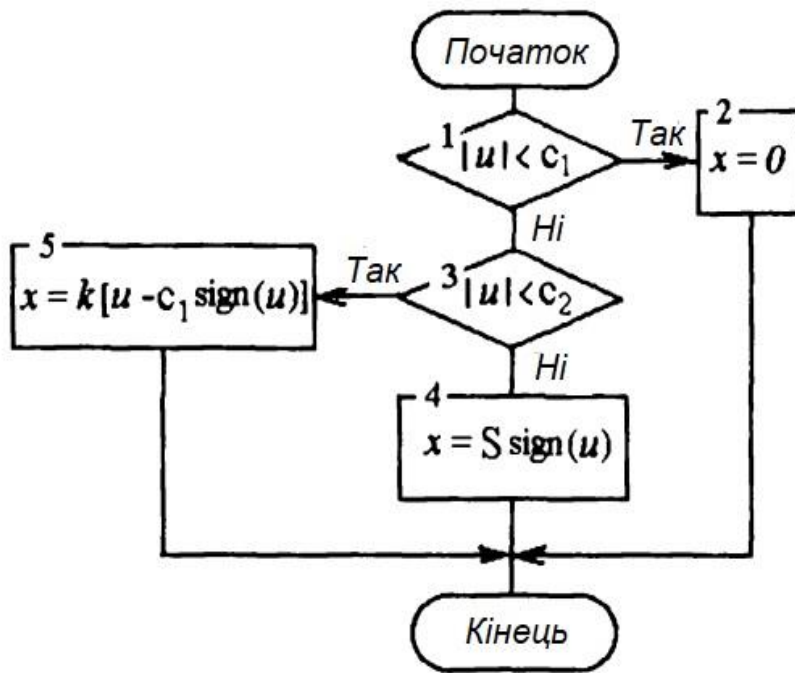
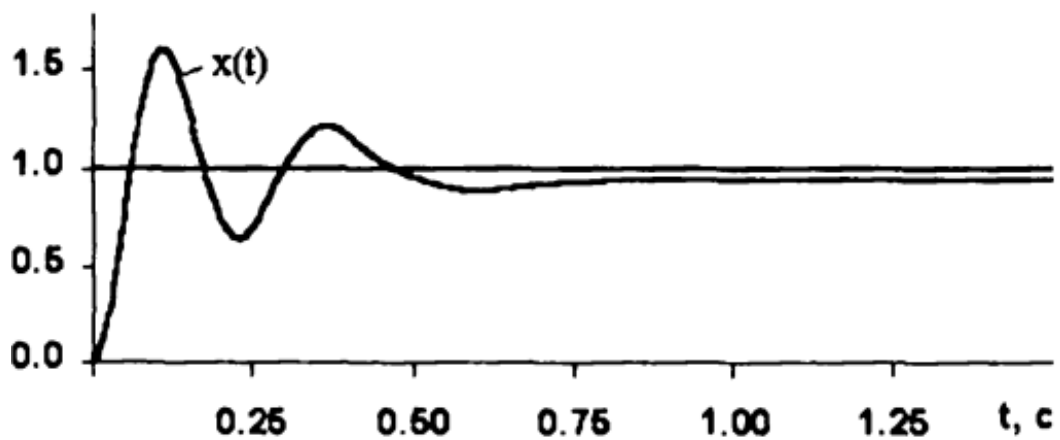
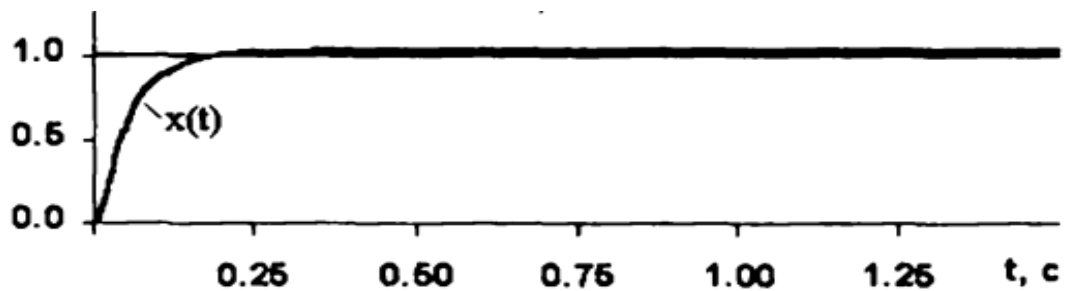


Рис. 3.5 Алгоритм моделювання нелінійності типу Н «зона нечутливості + насичення»



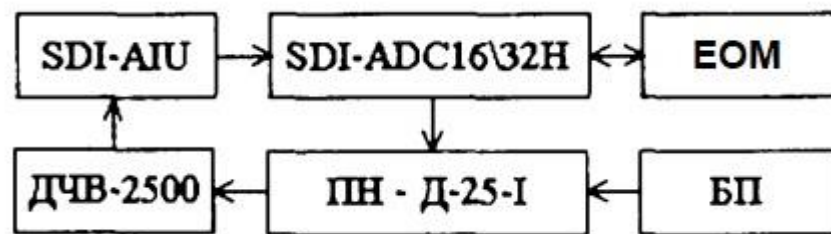
а) Реакція замкненої системи без нечіткого регулятора



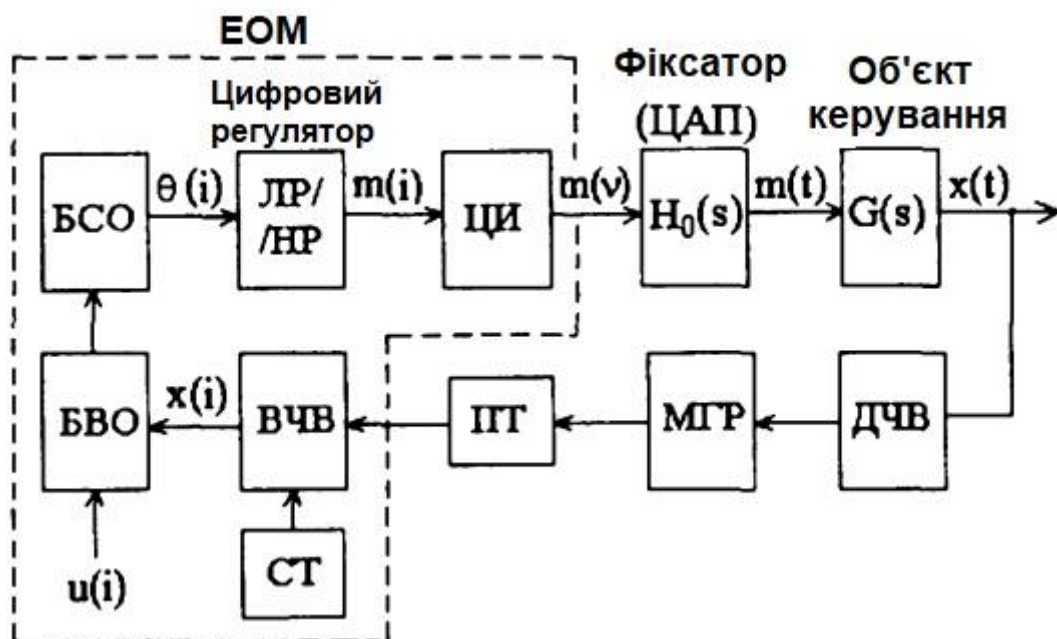
б) Реакція замкненої системи з нечітким регулятором

Рис. 3.6

В даній системі використовується нечіткий регулятор, в якій об'єктом керування є посилювач та електродвигун з навантаженням. Нижче описана діюча система керування двигуном постійного струму від ЕОМ з цифровим інтегратором, забезпечуючим астатизм першого порядку [21]. В ЕОМ може бути закладена програма роботи як цифрового лінійного регулятора, так і цифрового нечіткого регулятора. Така система може слугувати випробувальним стендом для натурного моделювання системи з реальними об'єктами, оскільки використовує натурні агрегати автоматики, включаючи промисловий комп'ютер, перетворювачі первинної інформації, пристрої сполучення з об'єктом керування [21].



а)



б)

Рис. 3.7

Функціональна схема системи керування двигуном постійного струму від ЕОМ приведена на рисунку 3.7 (б) [21]. ЕОМ типу IBM PC AT виконує наступні операції: 1. обчислювання поточних значень частоти оберту двигуна $x(i)$; 2.

Порівняння заданого значення частоти обертів двигуна $u(i)$ з реальним $x(i)$ і обчислювання помилки $\theta(i)$, яка надходить на цифровий регулятор з кроком квантування h ; 3. Програмну реалізацію алгоритму роботи цифрового лінійного або нечіткого регулятора і розрахунок керуючих впливів $m(i)$; 4. Фіксацію на крок квантування h і рекурентний інтегруючий вплив $m(i)$ з кроком інтегрування h_0 . Керуючий вплив від ЕОМ $m(v)$ з кроком інтегрування h_0 надходить на ЦАП [21].

Вихід $m(i) = m_i$ цифрового регулятора – 16-ти розрядний код (старший розряд визначає знак, інші розряди – величину сигналу), який оновлюється з кроком квантування $h = 0,1$ с та надходить на цифровий інтегратор ЦІ з кроком інтегрування $h_0 = 0,01h$. Цифровий інтегратор працює по рекурентному алгоритмі, складеному по методу трапеції [21]:

$$m_v = m_{v-1} + \frac{h_0}{2}(m_{iv} + m_{iv-1}).$$

Застосування цифрового інтегратора дозволяє забезпечити системі астатизм першого порядку та усунути помилку в усталеному режимі.

Сигнал на виході цифрового інтегратора $m(v) = m_v$ уявляє собою 16-ти розрядний доповнюючий двійковий код (старший розряд визначає знак, інші – величину сигналу), який оновлюється з кроком інтегрування $h_0 = 0,01h$. Цей сигнал надходить на ЦАП (фіксатор) з передатною функцією $H_0(p) = (1 - e^{h_0 p}) / p$, який перетворює коди $m(v) = m_v$, які зчитуються з системної магістралі ISA EOM у відповідну напругу постійного струму в діапазоні ± 10 В. ЦАП (у складі SDI-ADC16\32H) виконує функції пристрою сполучення ЕОМ з об'єктом керування [21].

Об'єкт керування складається з перетворювача напруги для лінійного посилення вихідного сигналу ЦАП (це – керуючий стабілізатор постійної напруги – пропорційна ланка з коефіцієнтом посилення $K_{nn} = 2,64$) і двигуна постійного струму ДПТ типу Д-25-1 з передатною функцією в режимі максимальної частоти обертів $K_{\partial\partial}(p) = K_{\partial\partial} / (T_{\partial\partial} p + 1)$, де $K_{\partial\partial} = 55,6$ Гц/В, $T_{\partial\partial} = 3,14$ с [21].

Таким чином, передатна функція об'єкту керування $W(p) = K_{nn} K_{\partial\partial} / (T_{\partial\partial} p + 1)$. Вихідна величина об'єкту керування $x(t)$ - частота обертів f ротору ДПТ – змінюється в межах від 0 до 100 Гц або від 0 до 6000 об/хв при зміні напруги живлення від 0 до 26,4 В.

Частота обертів ротора ДПТ вимірюється механічно зв'язаним з ротором двигуна датчиком частоти обертів ДЧВ-2500, який перетворює частоту обертів ротора ДПТ в синусоїдальну напругу [21]. Далі модуль гальванічної розв'язки МГР типу SDI-AUI перетворює кожен позитивний півперіод синусоїдального сигналу датчика в короткий (10мкс) прямокутний імпульс позитивної полярності TTL-рівня. Імпульси від МГР потрапляють на програмуєчий таймер ПТ типу KP580BI54 в складі модуля SDI-ADC16\32Н. Цей таймер є пристроєм сполучення об'єкту керування з ЕОМ в ланцюг. Зворотного зв'язку і з його допомогою здійснюється перетворення числа імпульсів в код і передача цього коду на системну шину ISA ЕОМ [21].

Перетворення імпульсної послідовності від МГР в код, відповідний значенню частоти обертів ротора ДПТ, виконується наступним чином. Програмований таймер ПТ модуля SDI-ADC запускається одночасно з системним таймером СТ та фіксується число імпульсів N , внутрішнього генератора ЕОМ від СТ та число імпульсів N_x від ПТ за інтервал виміру $t_{zm} = 0,2h$. При цьому кодуюче поточне значення частоти обертів ротора ДПТ (рис.3.7, б) визначається в обчислювачі частоти обертів ВЧВ по формулі [21]:

$$x(i) = 1,19 \times 10^6 N_x / N_s ,$$

де $1,19 \times 10^6$ (Гц) – частота внутрішнього кварцевого генератора ЕОМ.

Еквівалентну структурну схему системи зручну для розрахунку цифрових нечітких регуляторів, можна показати у вигляді зображеному на рис.3.3 [21].

3.3 Моделювання слідкуючого координатора з використанням нечіткої логіки в системі керування об'єктом з нелінійністю

Для моделювання було використано структурну схему яка використовувалася раніше але з додаванням блоку функції приналежності.

Моделювання проводилося в імітаційному середовищі Simulink. Для того, щоб подивитися, як поводитиме себе вихідний графік, в структурну схему з бібліотеки Simulink було взято з розділу Fuzzy Logic Toolbox функцію приналежності (Membership Functions) Triangular MF.

Для початку, проведемо моделювання без використання нелінійності. Задамо значення функції приналежності $a = -0,001$, $b = 5$, $c = 2$, де a і c - значення абсциси точок перегину, b - рівень насичення.

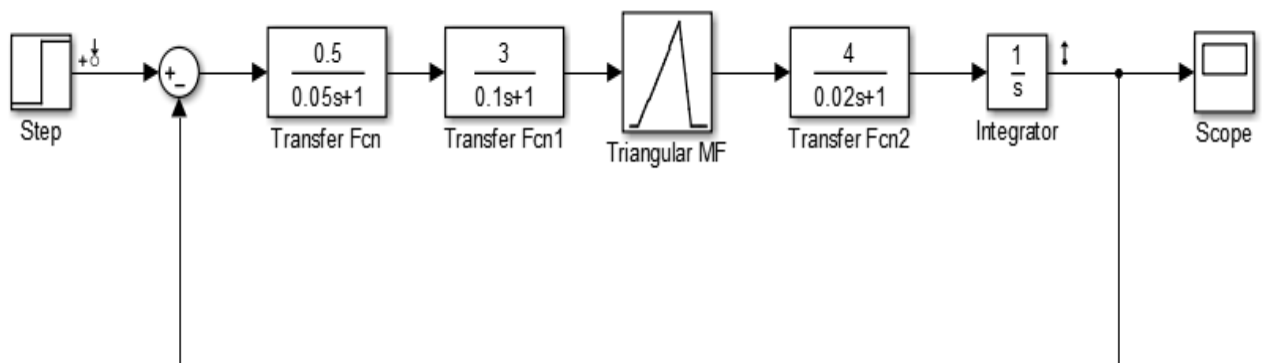


Рис. 3.8 Структурна схема слідкуючого координатора с функцією приналежності trimf.

На виході отримали графік:

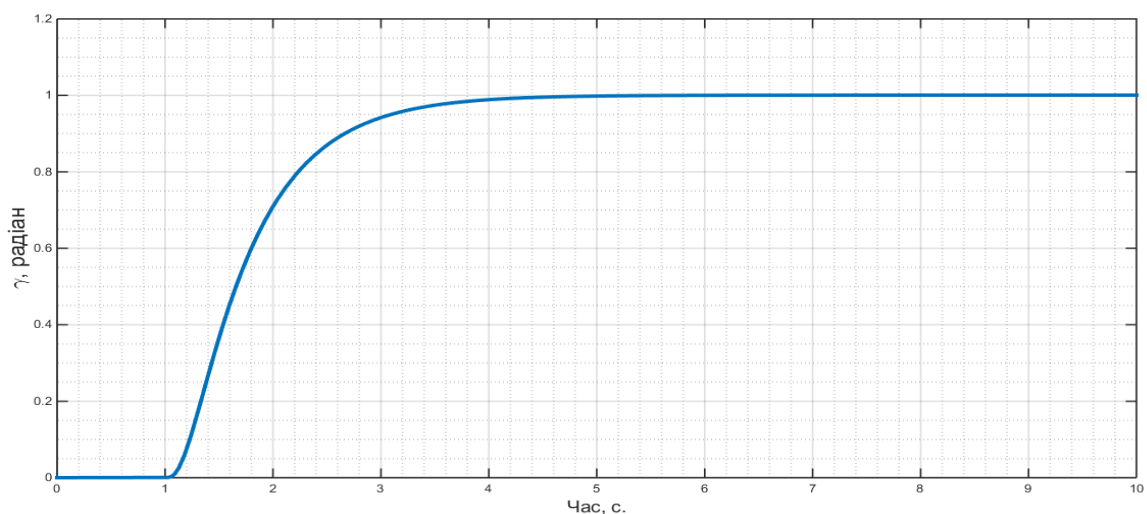


Рис.3.9 Графік перехідного процесу з використанням функції приналежності нечіткого регулятора.

На рис.3.9 видно, що при використанні функції приналежності нечіткого регулятора Triangular MF позбулися перерегулювання, що власне і треба було очікувати.

Далі в структурну схему помістимо блок нелінійності.

Для блоку нелінійності напишемо значеннями функції приналежності $a = -0,001$, $b = 1,5$, $c = 2$, та зони нечутливості $c_1 = \pm 0,1$.

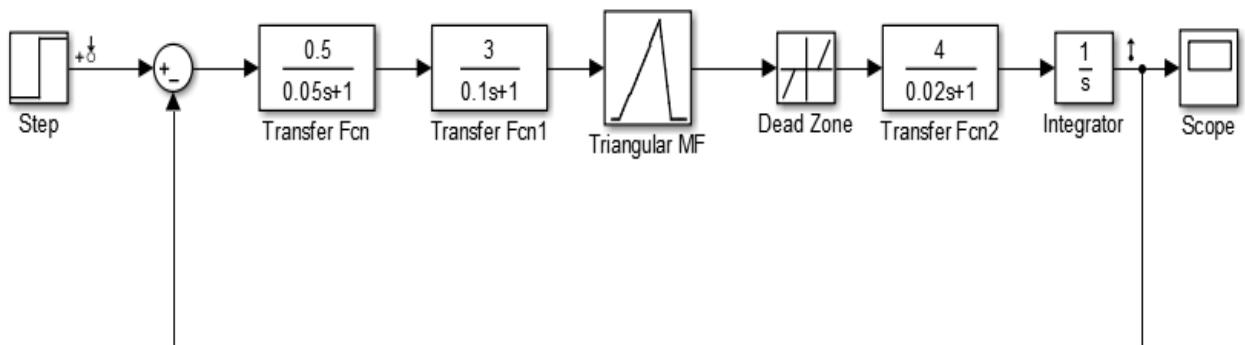


Рис.3.10 Структурна схема слідкучого координатора з функцією приналежності trimf та нелінійністю.

Отримали графік:

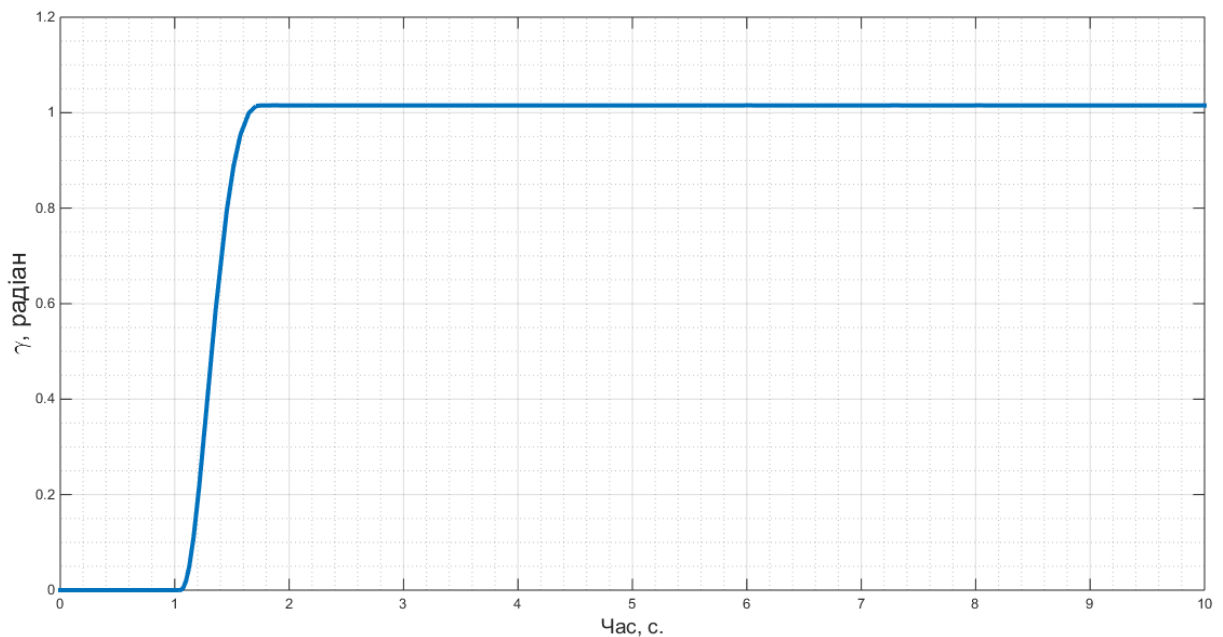


Рис.3.11 Графік перехідного процесу з використанням функції приналежності нечіткого регулятора та нелінійності.

З рис.3.11 видно, що при використанні нелінійності буде невелика похибка в у встановленому режимі, але вона незначна. Функція приналежності також усуває перерегулювання перехідного процесу.

Висновки до розділу 3

Було наведено функціональну та структурну схеми системи керування на базі нечіткої логіки. Описано головні етапи логічного виводу. Також проведено огляд алгоритму Мамдані на базі нечіткої логіки. Виконано дослідження синтезу нечіткого регулятора системи керування об'єктом з нелінійністю типу «зона нечутливості + насичення». Теоретично наведено загальний випадок при моделюванні з нечітким регулятором. Зроблено моделювання з додаванням функції приналежності Triangular MF та нелінійністю dead zone. Визначно, що нечітка множина trimf усуває перерегулювання системи, що у свою чергу робить її більш стійкою.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «СЛІДКУЮЧИЙ КООРДИНАТОР ДЛЯ ПІДВОДНОГО БЕЗПІЛОТНОГО АПАРАТУ»

4.1. Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології)

4.1.1 Зміст ідеї полягає у розробці системи слідкуючого координатора на підводному безпілотному апараті, для покращення характеристик захоплення та стеження за об'єктам. Проаналізовано можливі напрямки застосування, а також основні вигоди, що може отримати потенційний користувач товару за різними напрямками застосування (табл. 5.1).

Таблиця 5.1. Опис ідеї стартап проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Слідкуючий координатор на підводному безпілотному апараті	Приладобудування	Покращення роботи приладів управління в інфрачервоній області спектра випромінювання в активному режимі роботи.
	Військова промисловість	Зменшення завад при наведенні голівки самонаведення в зенітно-ракетних комплексах.
	Авіація	Більша територія захоплення та більша відстань відстеження об'єкту з повітря.
	Радіолокація	Збільшення території захоплення координат цілі.

Висновки: Існує досить багато сфер де актуальне використання запропонованої ідеї. Потенційних споживачів можна знайти як у цивільних сферах, таких як приладобудування, авіація, радіолокація, а також і у військовій сфері. Слід зазначити, що іноді слідкуючий координатор використовується також у мирних цілях, наприклад таких як зимова рибалка. А також існує багато вигідних умов для потенційних користувачів.

4.1.2 Далі проводимо аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів:

– визначаємо перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;

– визначаємо попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводимо збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;

– проводимо порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначено показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 4.2).

Таблиця 4.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко- економічні характерис- тики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтра льна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Арсенал КПСР	Артем ГАХК	Луч ДпДКБ			
1.	Дальність захоплення цілі	2 км	5 км	3,5 км	5,5 км	Мала дальніст ь захопле ння		
2.	Поле захоплення	4°	2,5°	2,2°	3°			Більше поле захопле ня об'єкту
3.	Поле огляду	75°	70°	75°	80°		Приблиз но однаков е поле огляду	
4.	Ціна	1400 ум. од.	1500 ум. од.	1100 ум.од.	2000 ум од.		Відносна середня вартість	
5.	Кутова швидкість	70°/с	60°/с	60°/с	60°/с			Більша кутова швидкість

	автосупровод у цілі							автосупрв оду цілі
--	------------------------	--	--	--	--	--	--	-----------------------

Висновки: Визначено трьох потенційних конкурентів («Арсенал» КПСП, «Артем» ГАХК, «Луч» ДпДКБ) і проведено порівняння основних техніко-економічних характеристик. Як видно з таблиці 4.2 проект має слабку сторону стосовно дальності захоплення цілі, нейтральні сторони має стосовно поля огляду та вартості продукту. Але має переваги у полі захоплення, а також кутова швидкість автосупроводу цілі.

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Проведено аудит технології за допомогою якою можна реалізувати ідею проекту (табл. 4.3). Це передбачає аналіз наступних складових:

- Технологію за якою буде виготовлено товар;
- Існування таких технологій;
- Доступність цих технологій.

Таблиця 4.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проек- ту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність техно- логій
1.	Збільшення поля захоплення об'єкту	Доповнення приладу додатковими датчиками	Наявні	Доступна
2.	Збільшення дальності захоплення об'єкту	Покращити оптико- електронну систему за рахунок кращого матеріалу	Наявні	Доступна
3.	Підвищенні швидкодії системи			Доступна
4.	Підвищення точності системи			Доступна

Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Покращення самої системи та застосування кращих деталей.

Висновки: За таблицею 4.3 обрано наступна технологія реалізації проекту – покращення самої системи та застосування кращих деталей, це є більш привабливим для користувачів, тому що систему легко буде підлаштовувати під різноманітні вхідні параметри і використовувати для різноманітного обладнання. Цю технологію потрібно розробити, що підвищує унікальність. Більшість описаних технологій реалізації є наявними та доступними.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

4.3.1 Визначено ринкові можливості, які можна використати під час впровадження проекту (табл. 4.4), ринкові загрози, які можуть негативно вплинути на реалізацію проекту. Це дозволяє правильно спланувати напрямки розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища.

Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (таблиця 4.4).

Таблиця 4.1. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	7
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	10000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Якщо розглядати військову, авіа- та приладобудівну сферу, то це сертифікація
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Існують (якщо розглядати військову сферу, а також авіа та приладобудівну)
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	41%

Висновки: Ринок є дуже привабливим для входження в зв'язку з гарною рентабельністю і загальним обсягом продаж. Існують певні обмеження, які стосуються просування товару на ринок військової сфери, де потрібно виконання специфічних умов на стандартизації та сертифікацію. Кількість основних гравців на ринку дорівнює 7, що є досить оптимальною конкуренцією. Висока рентабельність у галузі.

4.3.2 Визначено потенційні групи клієнтів, їх основні характеристики, на основі цього формується основний список вимог до товару (табл. 4.5).

Таблиця 4.2. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Застосування слідкуючої системи для визначення координат цілі.	Військові, розробка авіаційної техніки, приладобудування, радіолокація.	<ul style="list-style-type: none"> - Для військової техніки важлива точність та дальність; - В авіаційній техніці важливо поле захоплення цілі та дальність - В радіолокації поле огляду та дальність 	<ul style="list-style-type: none"> - Точність системи - Швидкодія системи - Надійність - Адаптивність

Висновки: Визначено основні цільові аудиторії (військові, розробка авіаційної техніки, приладобудування, радіолокація) та їх головні особливості, а також відмінності між головними вимогами до розробляємої системи у різних груп аудиторії. А також визначено основні вимоги споживачів до товару, які полягають у точності, швидкодії, надійності і адаптивності.

4.3.3 Аналіз ринкового середовища. Складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. № 4.6-4.7). Фактори в таблиці подавати в порядку зменшення значущості.

Таблиця 4.3. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Зріст конкуренції	Виход на ринок нових конкурентів, які будуть пропонувати більш дешевий аналог	Втрата клієнтів
2.	Зменшення попиту	Так як товар не орієнтований на широку публіку покупців, він може бистро перенасити	Відмова від товару у зв'язку з ненадійністю
3.	Вартість елементної бази	Збільшення сировини на компоненти системи	Відмова від товару внаслідок подорожчання
4.	Якість	Погана якість продукта, товар не надійний	Відмова від товару
5.	Зміни у сертифікації	Змінення стандартів сертифікації	Втрата клієнтів, для яких потрібен сертифікований товар

Висновки: У таблиці 4.6 описані основні види загроз, з яких самою головною загрозою обрано зріст конкуренції, що може призвести до відмови клієнтів від товару внаслідок появи більш дешевих аналогів, які зможуть запропонувати потенційному користувачу кращі або близькі характеристики. Інші загрози також є дуже важливими і потрібно їх враховувати, тому що їх наслідками може бути відмова користувачі від товару.

Але поряд із колом загроз існують і певні можливості (таблиця 4.7).

Таблиця 4.4. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Зростання попиту	Можуть з'явитись нові потенційні покупці, або компанії-конкуренти вийдуть з ринку	Зростання виробництва
2.	Необхідність модифікацій	Розширення можливостей системи за потребою користувачів	Вдосконалення та розширення можливостей системи за бажанням потенційних клієнтів
3.	Нові потенційні групи клієнтів	Поява нових потенційних груп покупців	Аналіз потреб нової групи покупців
4.	Здешевлення цін на компоненти	Зменшення цін на компоненти, внаслідок великої конкуренції між ними	Зменшення ціни на готову систему
5.	Зменшення витрат на виробництво	Країни де менша вартість робочої сили	Зменшення ціни на готову систему

Висновки: У таблиці 4.7 описані основні види можливостей, з яких самими головними обрано збільшення попиту, що призведе до зростання виробництва, а як наслідок цього можливі будь-які інші можливості описані у таблиці можливості. Інші фактори відкривають можливості для вдосконалення та розширення можливостей системи, а також до зменшення ціни на готову систему.

4.3.4 Аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку (табл. 4.8)

Таблиця 4.5. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції - чиста.	Достатньо невелика конкуренція.	- Можливість швидко проводити вдосконалення, випереджаючи конкурентів - Можливість прогнозування змін на ринку
2. За рівнем конкурентної боротьби - міжнародний.	Данна продукція користується попитом у всьому світі.	Вихід на міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою - міжгалузева.	Продукт використовується в різних галузях, як мирних цілях, так і в військових.	Аналіз зміни потреб для кожної потенційної групи клієнтів
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова.	Конкуренція товарів одного виду.	- Задоволення потреб клієнтів - Відповідність ринку
5. За характером конкурентних переваг - цінова.	Варіювання ціни внаслідок вибору користувачем функціональних особливостей	Пошук нових постачальників компонентів, які можуть запропонувати меншу ціну.
6. За інтенсивністю - немарочна.	Конкретного бренду немає, але значення має яка країна та яке підприємство виготовляє продукт	Залежить від якості продукту.

Висновки: Проаналізовано основні риси конкуренції на ринку, їх вплив на діяльність підприємства, а також можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною. Визначено, що конкуренція у галузі є невеликою, і вона існує між товарами одного виду, є можливості виходу на міжнародний ринок,

використання товару можливі у різноманітних сферах, а довіра до товару будується за рахунок якості продукту, адже підприємств які можуть виготовляти даний товар не так і багато.

4.3.5 Після проведення аналізу конкуренції проводиться аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю М. Портера) (табл. 4.9).

Таблиця 4.6. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	«Арсенал» «Артем» «Луч»	«Радар» «Авиант»	«Арсенал» «Луч»	Військова промисловість; Авіапромисловість	Системи відслідковування
Висновки:	Конкуренція у галузі присутня, але не є досить великою	Можливості виходу на ринок є, і вони не важкі. Існують потенційні конкуренти	Постачальники можуть диктувати умови ринку. За рахунок того, що можуть як самі виготовляти дану продукцію, так і окремі деталі для товару.	Клієнти практично не диктують умов, окрім військової промисловості та авіабудівної сфери, де існує обов'язкова сертифікація	Обмежень немає, тому що товар-замінник не є адаптивним і існують обмеження в використанні.

Висновки: За результатами аналізу, визначено, що з оглядом на конкурентну ситуацію, на ринку можна працювати. Конкуренція у галузі не велика, існують потенційні конкуренти. Постачальники можуть диктувати умови на ринку. Є специфічні умови з боку деяких потенційних клієнтів. Товари-замінники не в повній мірі та не в усіх галузях зможуть задовільнити потреби користувачів. Проект повинен мати такі сильні сторони: адаптивність, точність, високу

швидкодію, надійність, відповідність потрібним стандартам, щоб отримувати сертифікацію.

4.3.6 На основі аналізу конкуренції, проведеного в п. 3.5 (табл. 4.9), а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 4.2), вимог споживачів до товару (табл. 4.5) та факторів маркетингового середовища (табл. №4.6-4.7) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності (табл. 4.10).

Таблиця 4.7. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Точність	Алгоритм системи керування який забезпечує необхідну точність.
2	Адаптивність	Можливість використання системи при різноманітних умовах.
3	Швидкодія	Висока швидкодія системи, як наслідок – якість вихідного корисного ефекту.
4	Надійність	Система робить стабільно при різноманітних зовнішніх чинниках.
5.	Сертифікованість	Відповідність необхідним стандартам, для отримання сертифікатів, за потребою потенційних клієнтів.

Висновки: Визначено основні фактори конкурентоспроможності, які полягають у точності, адаптивності, швидкодії, надійності і сертифікованості, а також наведено обґрунтування, яке показує сильні сторони розроблюваного проекту і як ці сильні сторони можуть бути корисні потенційному клієнту при використанні товару, для порівняння з товарами-конкурентами.

4.3.7 За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 5.10) проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 5.11).

Таблиця 4.8. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ п/ п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з підприємством «Арсенал»						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Точність	16		+					
2	Адаптивність	19			+				
3	Швидкодія	19				+			
4	Надійність	15							+
5.	Сертифікованість	18				+			

Висновки: У порівнянні з товаром-конкурентом були визначені наступні сильні сторони, які полягають у адаптивності, швидкодії і сертифікованості товару. Слабкі сторони полягають у точності і надійності. Загалом товар є повністю конкурентоспроможним існуючим аналогам. Головні переваги полягають у високій швидкодії, відносно великій точності, а також у адаптивності до різноманітних факторів.

4.3.8 Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (табл. 4.12).

Таблиця 4.12. SWOT- аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <p>1. Гарна адаптивність системи до різноманітних факторів</p> <p>2. Висока швидкодія системи</p>	<p>Слабкі сторони</p> <p>1. Нижче точність відносно конкурентів</p>
--	---

3. Відповідність необхідним стандартам, для проходження сертифікації 4. Можливості застосування у військовій сфері, авіа та суднобудуванні 5. Висока максимальна вага обладнання яке стабілізується.	2. Так як продукт новий, його надійність до кінця не перевірена.
Можливості: 1. Зростання виробництва 2. Вдосконалювання системи 3. Вихід на міжнародний ринок.	Загрози: 1. Відмова від товару, внаслідок неякісності 2. Можливість не задоволення точністю системи у порівнянні з конкурентами, якщо цей чинник є найголовнішим для клієнта.

Висновки: Проведено SWOT-аналіз, за яким визначені можливі загрози і можливості, які передбачаються сильними та слабкими сторонами проекту. Загрози є, але вони більш пов'язані з тим, що продукт досить новий, і найвища точність у порівнянні з конкурентами на даному етапі не є головною метою, а більш увага приділяється адаптивності до різних факторів і високій швидкодії системи.

4.3.9 За SWOT-аналізом розроблено альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок. І визначено оптимальні строки реалізації.(табл. 4.13).

Таблиця 4.9. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Конкуренція	Середня	12 міс.
2.	Кооперація	Висока	9 міс.
3..	Індивідуалізм	Середня	18 міс.

Висновки: Після проведеного аналізу було обрано альтернативу – кооперація, коли максимізується загальний вигравш. Це пов'язано з високою ймовірністю отримання ресурсів, а також досить стислих строків на реалізацію. Інші альтернативи значно програють по ймовірності отримання ресурсів.

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

4.4.1 Визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 4.14)

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Військова промисловість	Потрібна перевірка перед використанням	Високий	Висока	Просто
2.	Авіація	Готові, якщо буде сертифікація	Високий	Середня	Середньо
3.	Приладобудування	Потрібна перевірка перед використанням	Середній	Середня	Середньо
4.	Радіолокація	Потрібна перевірка перед використанням	Високий	Висока	Просто

Які цільові групи обрано: Військова промисловість, авіація, приладобудування, радіолокація.

Висновки: Проведено опис цільових груп потенційних клієнтів, визначено готовність споживачів сприйняти продукт, орієнтований попит в межах галузі, інтенсивність конкуренції і простоту входу. В якості цільових груп було обрано де готові сприйняти товар без та з сертифікацією, а також де середня і низька простота входу. Так як буде проводитися робота у декількох сферах, то обирається стратегія диференційованого маркетингу.

4.4.2 Формування базової стратегії розвитку (табл. 4.15).

Таблиця 4.15. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	Кооперація	Стратегія диференційованого маркетингу.	<ul style="list-style-type: none"> - Використання нових досягнень - Задоволення вимог користувачів 	Стратегія диференціації

Висновки: Як базову стратегію розвитку було обрано стратегію диференціації, яке передбачає надання товару важливих з точки зору споживача відмітних властивостей, які роблять товар особливим за товари-конкуренти за певними характеристиками, іноді зважаючи на не досить важливими характеристики товару. Так буде більше увагу приділено адаптивності і високій швидкодії, але менше до точності.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.16).

Таблиця 4.10. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Проект не є першопрохідцем	Так, будуть шукатись нові споживачі, аналізуватися нові групи потенційних клієнтів, за рахунок кращого продукту ніж у конкурентів.	Копіювання не буде. Продукт може бути схожий за характеристиками, але перш за все, буде вдосконалення продукту, яке дасть можливість обігнати конкурентів в цій сфері.	Стратегія виклику лідера.

Висновки: Обрано стратегію конкурентної поведінки – стратегія виклику лідера. Яка полягає у протистоянні лідеру, завдяки створенню конкурентоспроможного товару, який у загальній кількості характеристик може зайняти найвищу позицію на ринку, і стати одним із самих привабливих для клієнтів. Також проект не являється прешопрохідцем на ринку. Основні характеристики товару конкурента не будуть копіюватись, а навпаки вдосконалюватись.

4.4.4 На основі вимог споживачів до постачальника та до продукту, в залежності від обраних стратегій конкурентної поведінки та базової стратегії розвитку розробляється стратегія позиціонування (табл. 4.17).

Таблиця 4.11. Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Надійність.	Стратегія диференціації	Використання якісного обладнання та деталей при виготовленні продукту.	Надійна.
2.	Точність.	Стратегія диференціації	Застосування вдосконаленої системи по відстежуванню об'єкту.	Високоточна, стабільна.
3.	Швидкодія.	Стратегія диференціації	Відповідно вдосконалення системи автоматичного керування.	Швидка, малий час встановлення.
4.	Ефективність.	Стратегія диференціації	Залежить від якості обладнання та системи керування.	Швидке встановлення, малий час затримки отримання сигналу.

Висновки: Сформульовано позицію власного проекту, це три ключові слова: ефективна, швидка, точна система. Це зроблено на основі аналізу головних вимог цільової аудиторії до розроблюваного товару, якими було обрано точність системи, швидкодію, ефективність, а також надійність системи продовж часу роботи. Як базова стратегія обрано – стратегію диференціації.

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Під час розроблення маркетингової програми першим кроком є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач. У таблиці 4.18 підсумовуємо результати аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.12. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Збільшення точності захоплення цілі, дальності цілі та поля зору де перебуває цікавий нам об'єкт.	Система є швидшою за інші по основним показникам стосовно слідкуючих координаторів, ціна є навіть нижчою ніж у конкурентів.	Швидкодія, ефективність, надійність, цінова політика, збільшення поля захоплення цілі.

Висновки: Як видно з табл. 4.18, для потенційного споживача існує досить багато переваг, які полягають у високій швидкодії, ефективності, відносно високій точності, надійності, підтримки споживача, можливостях широкого використання, відносно товарів-конкурентів. Деякі характеристики і можливості товари-конкуренти взагалі не можуть запропонувати у такій якості потенційному користувачеві.

4.5.2 Трирівнева маркетингова модель товару: (табл. 4.19)

Таблиця 4.19. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Продукт дає можливість відслідковувати об'єкти як під водою, так і в просторі. Вигідним є те, що на відміну від конкурентів, продукт буде вдосконалено та адаптовано під різні галузі використання.		
	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор

II. Товар у реальному виконанні	1. Точність.	1. 0,05°	1. Тх.
	2. Кутова швидкість автосупроводу.	2. 70°	2. Тх.
	3. Поле захоплення.	3. 4°	3. Тх.
	4. Ціна.	4. 1400 ум.од.	4. Тх.
	Якість: сертифікати відповідності якості ISO		
	Пакування		
	Марка: проект «Слідкуючий координатор на підводному безпілотному апараті»		
III. Товар із підкріпленням	До продажу: Вибір комплектації за бажанням користувача		
	Після продажу: Гарантійне обслуговування, сервісна підтримка.		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: завдяки патентуванню винаходу.			

Висновки: Зроблено опис трьох рівнів моделі товару, за яким легко зрозуміти призначення товару та які проблемні задачі він вирішує, основні властивості та технічні характеристики які може запропонувати даний товар, основні сертифікації товару, а також яка підтримка може очікувати цільового користувача до та після продажу. Захист товару від копіювання буде зроблено завдяки патентуванню.

4.5.3 Визначення цінових меж для встановлення ціни на потенційний товар (табл. 4.20).

Таблиця 4.20. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	1000-2000 ум. од.	700 – 4000 ум.од.	10000-18000 ум.од.	Нижня межа: 1000 ум.од. Верхня межа: 5000 ум.од.

Висновки: Встановлено межі ціни на товар, які дорівнюють від 1000 до 5000 ум.од. Ціна є оптимальною для запропонованих користувачу характеристик, і

находиться на рівні товарів-конкурентів. Ціна базувалась на ціні розробки товару, а також на цінах основних компонентів елементної бази, яка використовується при збиранні готової системи. Визначено рівень доходів цільової групи споживачів, але треба зазначити, що ці системи не на широку аудиторію, тобто їх основними споживачами є компанії.

4.5.4 Визначення оптимальної системи збуту (табл. 4.21).

Таблиця 4.21. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Рознічна закупівля	Супровід товару на всьому етапі доставки до кінцевого споживача.	Канал одного рівня	Підприємства рознічної торгівлі
2.	Оптова закупівля	Супровід товару на всьому етапі доставки до кінцевого споживача, з додатковими умовами і бонусами.	Дворівневий канал	Підприємства оптової торгівлі
3.	Орендування	Консультація щодо використання обладнання	Канал нульового рівня	Підприємства від виробника

Висновки: Встановлено глибини каналу збуту та оптимальні системи збуту за специфікою закупівельної поведінки цільових клієнтів. Основні це рознічна закупівля, оптова закупівля та орендування. Визначено функції збуту які повинен виконувати постачальник товару. Визначено через що оптимально реалізовувати збут при різних специфіках закупівельної поведінки цільових клієнтів.

4.5.5 Розроблення концепції маркетингових комунікацій (табл. 4.22).

Таблиця 4.22. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Отримання якісного продукту, який буде вимагати певних умов, які необхідні клієнту.	Телефон мобільний/стаціонарний, інтернет.	Швидка, надійна, точна система.	Приваблення нових клієнтів, розповсюдження інформації серед потенційних клієнтів	Перш за все повідомлення про вдосконалену систему, яка є більш надійнішою та точнішою.

Висновки: Розроблено концепцію маркетингової комунікації, яка буде полягати у привабленні нових цільових клієнтів, за допомогою інтернету та телефону, які обрані основними каналами комунікацій, шляхом розміщення рекламного звернення в якому буде розповідатись про вдосконалену, швидку і точну систему, за невелику ціну відносно товарів конкурентів.

Висновки до розділу 4

При розробці стартап-проекту було зроблено всі етапи необхідні для правильного аналізу ринку, потенційних клієнтів, конкурентоспроможності, факторів ризику та можливостей, вибору правильних стратегій для впровадження стартап-проекту на ринок, для того щоб він став успішним.

Визначено основні напрямки застосування та вигоду для користувачів, а також сильні та слабкі сторони проекту у порівнянні з товарами-конкурентами. На основі цього було виявлено, що на товар існує досить великий попит у різноманітних сферах, таких, як авіабудування, морська справа, кінематограф, військова промисловість. Товар має досить гарні показники у порівнянні з товарами-конкурентами.

Проведено технологічний аудит проекту для вибору правильної технології реалізації ідеї проекту. Було обрано технологію - підвищення адаптивності системи, що є більш привабливим для користувачів, тому що система буде універсальною.

Проведено аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту, за яким було виявлено, що ринок є дуже привабливим для входу, а середній рівень рентабельності у галузі є високим. Визначено основні цільові аудиторії клієнтів, а також головні відмінності між ним. Основним ризиком загроз обрано зріст конкуренції, внаслідок чого може початися втрата клієнтів. А основною можливістю є зростання попиту, що призведе до збільшення виробництва. Проаналізовано основні риси конкуренції на ринку і визначено, що конкуренція у галузі є невеликою, є можливості виходу на міжнародний ринок, а використання товару можливе у різноманітних сферах. За результатами аналізу за моделлю М. Портера, визначено, що з оглядом на конкурентну ситуацію, на ринку можна працювати. Конкуренція у галузі не велика, існують потенційні конкуренти. Постачальники не диктують умов на ринку. Є специфічні умови з боку деяких потенційних клієнтів. Товари-замінники не зможуть задовільнити потреби користувачів. Визначено фактори конкурентоспроможності за якими проведено аналіз сильних та слабих сторін проекту: сильні сторони це адаптивність, швидкодія і сертифікованість товару. Слабкі сторони полягають у точності і надійності. Після проведеного SWOT – аналізу було обрано альтернативу ринкової поведінки – кооперація.

Розроблено ринкову стратегію проекту. Як цільові групи обрано: кінематограф, авіаційне будування, суднобудування. : Як базову стратегію розвитку було обрано стратегію диференціації. Обрано стратегію конкурентної поведінки – стратегія лідера.

Сформульовано позицію власного проекту, це три ключові слова: адаптивна, швидка, точна система.

Розроблено маркетингову програму стартап-проекту, за якою встановлено, що для потенційного користувача товару є багато переваг, які не можуть запропонувати конкуренти. Встановлено межі ціни на товар, які дорівнюють від

1000 до 5000 ум.од. Ціна є оптимальною і знаходиться на рівні товарів-конкурентів. Встановлено глибини каналу збуту та оптимальні системи збуту і розроблено концепцію маркетингової комунікації, яка буде полягати у привабленні нових цільових клієнтів. Проект є доцільним в його використанні.

ВИСНОВКИ

Проведено огляд стану сучасних слідкуючих систем, а зокрема оптико-електронні та радіотехнічні координатори цілі. Проаналізувавши попередні дослідження та розвиток слідкуючих координаторів, можна сказати, що це є доволі перспективним напрямком на сього. На сьогоднішній день актуальною є проблема розробки слідкуючих систем наведення. Сучасні слідкуючі комплекси представляють собою сукупність пристроїв призначених для виявлення, розпізнавання, визначення координат цілі та рішення задачі її супроводу. Слідкуючі координатори використовуються багато де. Прикладом є військова промисловість, авіапромисловість, використання координаторів на підводних апаратах і все має на меті одне, виявлення, захоплення та відсежування цілі. Для того, щоб покращити вище перераховані завдання для координатора, в роботі було запропоновано в систему застосувати нечіткий регулятор на нечіткій логіці. Проведено дослідження слідкуючого координатора, як системи автоматичного керування. Описано загальні характеристики слідкуючого координатора. Наведено структурну схему та на основі цієї схеми досліджено динамічні характеристики слідкуючого координатора. Проведено аналіз усталеної похибки за ступінчастим (функція Хевісайда) та синусоїдальним (гармонічне збудження) сигналами. Аналіз за критерієм Гурвіца. Було проведено моделювання в графічному середовищі Simulink, а саме дослідження на реакцію функції Хевісайда та гармонічного збудження. Побудовано логарифмічно-частотні характеристики. Досліджувалася структурна схема з додаванням блоку нелінійності.

Проведено дослідження характеристик цифрового нечіткого регулятора. Розглянуто функціональну та структурні системи керування на базі нечіткої логіки. Проведено огляд алгоритму Мамдані для нечіткого виводу. Дослідження синтезу нечіткого регулятора системи керування об'єктом з нелінійністю. Проведено модулювання слідкуючого координатора з використанням нечіткої логіки в системі керування об'єктом з нелінійністю. На основі дослідження можна з впевненістю сказати, що використання нечіткого регулятора є цілком доцільним для слідкуючої системи. Було проведено розробку стартап-проекту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Автоматическое управление. Следящие системы. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://works.doklad.ru/view/2FZjLP13MP8.html>.
2. Криксунов Л. З. Следящие системы с оптико-электронными координаторами / Л. З. Криксунов., 1991. – 156 с.
3. Радиолокация [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: http://www.krugosvet.ru/enc/nauka_i_tehnika/voennaya_tehnika/RADIOLOKATSIYA.html.
4. Кравченко В. И. Радиотехнические координаторы – как элемент построения РЛС [Электронный ресурс] / В. И. Кравченко. – 2009. – Режим доступа до ресурсу: <http://mirznaniy.com/a/122234/radiotekhnicheskie-koordinatory-kak-element-postroeniya-rls>
5. Пат. 2395108 Российская федерация, МПК G02B26/10. Оптико-электронный следящий координатор (варианты) / В.И. Вольнов, Г.В. Родин, Г.С. Морозов, В.В. Медведев, Л.Н. Рисунов; патентообладатель(и): Федеральное государственное унитарное предприятие "Производственное объединение "Уральский оптико-механический завод" имени Э.С. Яламова" (RU); заявка: 2008135849/28, 04.09.2008, опубл. 20.07.2010.
6. Фомичев К.Ф., Андреев С.М. Алгоритм определения угловой скорости визирования/ к.т.н. К.Ф. Фомичев, к.т.н. С.М. Андреев / представил д.т.н., проф. Д.В. Голкин) / ISSN 1681-7710. Системи обробки інформації, випуск 1(17), 2002. С. 1-4.
7. Патенты России: Способ формирования оптического поля для телеориентирования управляемых объектов и устройство для его осуществления [Электронный ресурс] / [Л. Г. Андриевский, В. В. Исаев, А. Ф. Модеев та ін.] // Патентообладатель:ФГУП "Центральный научно-исследовательский институт точного машиностроения". – 1005. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.findpatent.ru/patent/210/2100745.html>.

8. Кулалев В.В. Математическая модель вероятности срыва автоматического сопровождения цели оптической системы при взаимодействии на нее оптическими организованными помеховыми сигналами / В.В. Кулалаев (представил д.т.н., проф. В.И. Карпенко) / ISSN 1681-7710. Системи обробки інформації, випуск 7(35), 2004. С. 1-14.
9. Пат. 2042101 Российская федерация, МПК F41G7/00. Следящий координатор цели / В.Г. Григорьев, Д.В. Григорьев. - №93026340/09; заявл. 07.05.1993, опубл. 20.08.1995
10. Угловой координатор полуактивной системы самонаведения [Электронный ресурс] // Радиосистемы управления. Лабораторный практикум. – Режим доступа до ресурсу: <http://media.ls.urfu.ru/535/1424/3253/>.
11. Молодык А.В., Ткаченко Е.А. Метод юстировки оптико-электронных координаторов цели / А.В. Молодык, Е.А. Ткаченко // Методи і системи оптично-електронної та цифрової обробки сигналів / Вісник НТУУ «КПІ». Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ. – 2011. – Вип. 41. – С 47 – 52.
12. Системы управления и динамика полета ракет / Пугачев В.С., Казаков И.Е., Гладков Д.И., Евланов Л.Г., Мишаков А.Ф., Седов В.Д. / Под ред. Пугачева В.С. – М.: Издание ВВИА им. Проф. Н.Е. Жуковского, 1965. – 616 с.
13. Бурау Н.І., Мураховський С.А., Сопілка Ю.В. Методичні вказівки до виконання розрахункових робіт з курсу «Теорія автоматичного керування». – Київ: НТУУ «КПІ», 2007. – 32 с.
14. Критерий устойчивости Гурвица [Электронный ресурс] // TehnoInf.Ru. – 2009. – Режим доступа до ресурсу: www.tehnoinfo.ru/teorijasistempravlenija/25.html.
15. Гостев В.И. / В.И. Гостев // Нечеткие регуляторы в ситемах автоматического управления. – К.: «Радиоаматор», 2008. – 972 с.
16. Дьяконов В., Круглов В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2001. – 480 с.
17. Mamdani E.H. Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. – IEEE Transactions on Computers, vol.26, no. 12, 1997, pp.1182-1191.

18. Mamdani E.H. Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers. – International Journal of Man-Machine Studies, vol.8, 1976, pp669-678.
19. Гостев В.И., Данилов В.А. Модификации нечеткого вывода в нечеткой логике // Вісник технологічного університету Поділля (Хмельницький державний університет). – 2004, №2, Ч.1, Т.1(60). – С.10-13.
20. Гостев В.И., Чуприн А.Е., Гостев В.В. Синтез нечеткого регулятора системи управління об'єктом с нелинейностью типа «зона нечувствительности + насыщение» // Механіка та машинобудування. – 2000. – №2. – С.154-158.
21. Гостев В.И., Лозня С.В., Гостев В.В., Успенский А.А. Система управления двигателем постоянного тока от ЭМВ // Електротехника и електроенергетика. – 2001. №1. – С.17-19.